



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**VLIV SKLONU PŘÍVODNÍHO POTRUBÍ NA Q/H
CHARAKTERISTIKU MĚRNÉHO ŽLABU PARS P3**

THE INFLUENCE INCLINATION OF SUPPLY PIPE TO THE Q/H CHARACTERISTIC OF MEASURING
FLUME PARS P3

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Naiser

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ZUBÍK, Ph.D.

BRNO 2017

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

| | |
|-----------------------------------|---|
| Vedoucí práce | Ing. Pavel Zubík, Ph.D. |
| Autor práce | Dominik Naiser |
| Škola | Vysoké učení technické v Brně |
| Fakulta | Stavební |
| Ústav | Ústav vodních staveb |
| Studijní obor | 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby |
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Název práce | Vliv sklonu přívodního potrubí na Q/H charakteristiku měrného žlabu PARS P3 |
| Název práce v anglickém jazyce | The influence inclination of supply pipe to the Q/H characteristic of measuring flume PARS P3 |
| Typ práce | Bakalářská práce |
| Přidělovaný titul | Bc. |
| Jazyk práce | Čeština |
| Datový formát elektronické verze | PDF |
| Abstrakt práce | Tato bakalářská práce se zabývá vlivem přívodního potrubí na Q/H charakteristiku měrného žlabu PARS P3. Byla provedena měření Q/H charakteristik pod různými sklony přívodního potrubí a měrného žlabu. Následně pak byly tyto měření zpracovány a z výsledků byly stanoveny korekce a nejistoty měření. |
| Abstrakt práce v anglickém jazyce | This bachelor thesis deals with the influence of the inlet pipe on the Q / H characteristic of the measuring flume PARS P3. Measurements of Q / H characteristics were performed under different inclination of the inlet pipe and the measuring flume. Subsequently, these measurements were processed and the corrections and uncertainties of the measurements were determined from the results. |
| Klíčová slova | Měření průtoku, Q / h charakteristika, měrný žlab, Parshall, vliv sklonu, sklon přívodního potrubí, nejistoty měření, korekce průtoku |
| Klíčová slova v anglickém jazyce | Flow measurement, Q / h characteristic, flume, Parshall, influence inclination, the inclination of the inlet pipe, uncertainty of measurement, flow correction |



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby |
| Pracoviště | Ústav vodních staveb |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|---|
| Student | Dominik Naiser |
| Název | Vliv sklonu přírodního potrubí na Q/H charakteristiku měrného žlabu PARS P3 |
| Vedoucí práce | Ing. Pavel Zubík, Ph.D. |
| Datum zadání | 30. 11. 2016 |
| Datum odevzdání | 26. 5. 2017 |

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby, 1. vydání, SNTL Praha, 1968

Metrologický předpis MP 010, ČMI Brno, 2013

<http://www.pars-aqua.cz/>

Žoužela, M.: Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou, disertační práce, VUT v Brně 2005

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Student provede v laboratoři ÚVS-LVV opakovaně měření závislosti průtoku na hloubce vzdutého proudu měrným žlabem PARS P3 při různém sklonu přívodního potrubí. Následně provede rozbor naměřených hodnot a navrhne vhodnou korekci výrobcem dodávané charakteristiky pro kompenzaci vlivu sklonu přítokového potrubí. Definuje nejistotu stanoveného průtoku pro případy, kdy nelze sklon potrubí stanovit. Cílem je zpřesnění stanovené hodnoty průtoku.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem přírodního potrubí na Q/H charakteristiku měrného žlabu PARS P3. Byla provedena měření Q/H charakteristik pod různými sklony přírodního potrubí a měrného žlabu. Následně pak byly tyto měření zpracovány a z výsledků byly stanoveny korekce a nejistoty měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření průtoku, Q/H charakteristika, měrný žlab, Parshall, vliv sklonu, sklon přírodního potrubí, nejistoty měření, korekce průtoku

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the influence of the supply pipe on the Q/H characteristic of the measuring flume PARS P3. Measurements of Q/H characteristics were performed under different inclination of the supply pipe and the measuring flume. Subsequently, these measurements were processed and the corrections and uncertainties of the measurements were determined.

KEYWORDS

Flow measurement, Q/H characteristic, flume, Parshall, influence inclination, the inclination of the supply pipe, uncertainty of measurement, flow correction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Dominik Naiser *Vliv sklonu přívodního potrubí na Q/H charakteristiku měrného žlabu PARS P3*. Brno, 2017. 54 s., 26 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu panu Ing. Pavlovi Zubíkovi Ph.D. za vstřícný přístup, pomoc, cenné připomínky a metodické vedení při vlastním měření a zpracovávání bakalářské práce. Děkuji celému kolektivu pracovníků a výzkumníků Laboratoře vodohospodářského výzkumu. Poděkování též patří panu Ing. Janu Vršeckému, CSc. z firmy PARS-Aqua, s.r.o. za zapůjčení měrného žlabu PARS P3. V neposlední řadě děkuji svým rodičům, že mi umožnili studovat na Vysoké škole.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26. 5. 2017

Dominik Naiser
autor práce

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2017

Dominik Naiser
autor práce

OBSAH

| | |
|---|----|
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A OZNAČENÍ | 12 |
| 1. ÚVOD..... | 13 |
| 2. MĚŘENÍ PRŮTOKU..... | 14 |
| 2.1 Definice Průtoku | 14 |
| 2.1.1 Hmotnostní průtok..... | 14 |
| 2.1.2 Objemový průtok | 14 |
| 2.2 Uplatnění měření průtoků..... | 15 |
| 2.3 Metody měření průtoku s volnou hladinou | 15 |
| 2.3.1 Metoda kontinuální..... | 15 |
| 2.3.2 Metoda Q/H charakteristiky | 17 |
| 3. MĚRNÉ PŘELIVY A ŽLABY | 17 |
| 3.1 Měrné přelivy..... | 17 |
| 3.1.1 Ostrohranné přelivy s bočním zúžením | 18 |
| 3.2 Měrné žlaby | 19 |
| 3.2.1 Žlaby typu Venturi..... | 20 |
| 3.2.2 Žlaby typu Saniiri..... | 20 |
| 3.2.3 Žlab typu Parshall | 21 |
| 3.3 Žlaby PARS | 24 |
| 3.3.1 PARS P3..... | 26 |
| 4. TECHNICKÉ, METROLOGICKÉ A PROVOZNÍ POŽADAVKY NA MĚŘÍCÍ SYSTÉMY VYUŽÍVAJÍCÍ ŽLAB JAKO VZDOUVACÍ OBJEKT | 27 |
| 4.1 Přítokové koryto..... | 27 |
| 4.2 Vzduvovací objekt – žlab | 28 |
| 4.3 Odtokové koryto | 28 |
| 4.4 Snímač hladiny a vyhodnocovací jednotka | 28 |
| 5. MOTIVACE A CÍL PRÁCE..... | 30 |
| 6. PRAKTICKÁ ČÁST | 30 |
| 6.1 Laboratoř..... | 30 |
| 6.1.1 Měrná trať..... | 31 |
| 6.1.2 Použitá měřicí technika | 34 |
| 6.2 Postup měření a modifikace modelu..... | 36 |
| 6.2.1 Postup měření..... | 36 |
| 6.2.2 Modifikace | 37 |
| 6.3 Zpracování dat, výsledky..... | 39 |
| 6.3.1 Q/H charakteristiky..... | 40 |
| 6.3.2 Procentuální odchylky..... | 41 |
| 6.3.3 Grafy ΔH , ΔQ | 42 |
| 6.3.4 Freudovo kritérium..... | 47 |
| 7. ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ | 49 |
| 8. ZÁVĚR | 50 |
| 9. CITOVANÁ LITERATURA | 51 |

| | |
|----------------------|----|
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 52 |
| SEZNAM TABULEK..... | 53 |
| SEZNAM GRAFŮ..... | 53 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 54 |

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A OZNAČENÍ

| Označení: | Popis: | Jednotka: |
|--------------------|---|---------------------|
| a, b, c, d | koeficienty definující příslušnou funkční závislost | [-] |
| B | šířka hrdla | [mm] |
| C_d | průřezový součinitel | [-] |
| D | průměr přívodního potrubí | [mm] |
| Fr | Freudovo kritérium | [-] |
| g | tíhové zrychlení | [m/s ²] |
| H | hloubka proudu protiproudě před žlabem | [mm] |
| h | výška přepadového paprsku | [mm] |
| h_a | hloubka horní vody | [mm] |
| h_b, h_d | hloubka dolní vody | [mm] |
| h_{pl} | výška koruny žlabu | [mm] |
| $H_{max.}$ | maximální výška vzduté hladiny | [mm] |
| k | opravný koeficient | [-] |
| m | hmotnost | [kg] |
| $M\check{Z}$ | měrný žlab | [-] |
| n | exponent závisující na b | [-] |
| Q | průtok | [l/s] |
| Q_m | hmotnostní průtok | [kg/s] |
| $Q_{měř, max.}$ | maximálně měřitelný průtok | [l/s] |
| Q_v | objemový průtok | [l/s] |
| R^2 | hodnota spolehlivosti | [-] |
| S | průtočná plocha | [m ²] |
| t | doba proudění | [s] |
| t_l | tloušťka přelivné hrany | [mm] |
| u | rychlost vykazovaná systémem | [m/s] |
| V | proteklý objem | [l] |
| v | průřezová rychlost | [m/s] |
| y_k | kritická výška | [mm] |
| $y_{měř, max}$ | hloubka odpovídající průtoku vzdouvacím objektem při $Q_{měř, max.}$ | [mm] |
| σ, σ_c | součinitel zatopení | [-] |
| ΔH | odchylka výšky vzduté hladiny od referenční | [%] |
| ΔQ | odchylka průtoku od referenční hodnoty | [%] |

1. ÚVOD

Na měření průtoků a proteklých objemů je v dnešní době kladen veliký nárok. Každý uživatel měřicího objektu požaduje jednoduchost, minimální obsluhu, spolehlivost a co největší přesnost celého měřicího systému. Mezi základní měřicí objekty s prouděním o volné hladině patří i měrný žlab PARS, který je modifikací Parshallova žlabu. Tento žlab se smí umísťovat do šachet (jak je patrné z Obr. 1), kde ale často nejsou vždy dodrženy optimální požadavky na přítokové a odtokové části měřicího systému.

Cílem této práce je stanovit nejistoty, které nastávají při měření průtoku, pokud je na měrný žlab napojené přívodní potrubí o různém sklonu a tím nejsou dodrženy optimálních metrologické technické požadavky

Tento problém byl simulován v Laboratoři vodohospodářského výzkumu na fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně.

Samotná práce je rozdělena na dvě části, teoretickou (kapitoly 2, 3, 4) a praktickou (kapitoly 5, 6, 7)

V úvodu teoretické části práce jsou popsány metody měření průtoků a měřicí objekty, které se instalují do profilů s prouděním o volné hladině, zvláště popisuje žlab PARS P3. Dále se práce zaměřuje na technické, metrologické a provozní požadavky na měřicí systém využívající žlab jako vzdouvací objekt.

Praktická část, která proběhla v laboratoři se skládá z popisu měřicí a laboratorní techniky, postupu měření, popisu modifikací modelu, a nakonec popisuje zpracování naměřených dat a prezentuje výsledky.)

Součástí práce je celá řada tabulárních a grafických příloh, zajímavé poznatky jsou vybrány a zařazeny na konec této práce do samotných příloh.

Výzkum přináší nové poznatky v oblasti vlivu sklonu přívodního potrubí na Q/H charakteristiku měrného žlabu PARS P3



Obr. 1) Pohled na Měrný žlab PARS v šachtě [1]

2. MĚŘENÍ PRŮTOKU

V této kapitole je popsán průtok jako hydraulická veličina a typy měřených průtoků. Dále se čtenář dovídá o skupinách, kde je zapotřebí měřit průtok a o základním dělení proudění na:

- tlakový režim a
- s volnou hladinou.

2.1 Definice Průtoku

Průtok je základní hydraulická veličina. Z hlediska fyziky je vznik průtoku definován jako změna pohybového stavu tělesa tekutin působením sil, po překonání počátečního napětí. Průtokem lze označit tři různé veličiny [2]. Může se jednat o hmotnostní, objemový, nebo rychlostní průtok.

2.1.1 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok je hmotnost tekutiny, která proteče průtočným profilem za jednotku času. Tento průtok tedy zavádíme, pokud nás zajímá hmotnost měřené tekutiny. Hmotnostní průtok nám popisuje následující rovnice:

$$Q_m = m/t, \quad (1)$$

kde

Q_m – hmotnostní průtok,

m – hmotnost,

t – doba proudění.

2.1.2 Objemový průtok

Objemový průtok je definován jako objem tekutiny, který proteče průtočným průřezem za jednotku času tedy:

$$Q_v = V/t, \quad (2)$$

kde

Q_v – objemový průtok

V – proteklý objem

t – doba proudění

2.2 Uplatnění měření průtoků

S rostoucím počtem lidí, legislativy a požadavků na komfort obyvatel je zapotřebí měřit průtoky a proteklé objemy. Zejména proto, že některé proteklé objemy (zásobování vodou, odpadní vody, ...) jsou zpoplatněny. Situace, kdy je potřeba měřit průtoky a proteklé množství se například dají rozdělit do následujících skupin:

- hydrologická bilance – určení průtoků v tocích,
- odběry vody – zásobování obyvatelstva pitnou vodou, průmysl, energetika,
- technologické procesy – úpravy a čistírny vody, chemický průmysl, potravinářský průmysl, ...,
- kanalizační sítě – vypouštění odpadních vod,
- transport – dálková doprava vody, páry, plynu, ropy, chemikálií, ...,
- a další.

Dále se budeme věnovat pouze měření kapalin.

Podle stavu hladiny – tlakových poměrů, můžeme měření průtoků kapalin rozdělit:

- měření proudění s volnou hladinou – kdy je povrch hladiny v bezprostředním kontaktu s ovzduším a na hladinu působí atmosférický tlak, týká se to například koryt řek, přiváděcích kanálů, žlabů a stokových systémů
- a měření tlakového proudění – které se vyskytuje zvláště v uzavřených profilech, kde kapalina protéká celým průtočným průřezem a v každém místě je tlak různý od atmosférického, například ve vodovodním potrubí a produktovodech.

Dále se zaměříme pouze na měření s volnou hladinou.

2.3 Metody měření průtoků s volnou hladinou

Tato kapitola se zabývá metodou měření průtoků s volnou hladinou. Popisuje základní principy, které využívají měřicí zařízení napevno instalovaná do profilů s volnou hladinou. Mezi tyto základní principy se řadí metoda Q/H charakteristiky a metoda kontinuity [3].

2.3.1 Metoda kontinuity

Jedná se o metodu, která vychází ze základní rovnice kontinuity:

$$Q = S \cdot v, \quad (3)$$

kde

Q – hledaný průtok,

S – plocha průtočného průřezu,

v – průřezová rychlost.

Tato metoda využívá principu spojitosti proudu v profilech s volnou hladinou. Spočívá ve změření dvou samostatných veličin, které na sobě nejsou závislé. Jsou to konkrétně hloubka H a měřená rychlost u .

Ze známé šířky měrného profilu a měrné hloubky H se stanoví průtočná plocha S . Průtočnou rychlost získáme násobením měřené rychlosti u opravným koeficientem k .

Měřenou rychlost u můžeme získat několika způsoby. Mezi nejpoužívanější se řadí:

- hydrometrická vrtule – nejběžnější zařízení pro měření v otevřených korytech a v potrubích větších rozměrů,
- elektromagnetická měřidla rychlosti,
- indukční měřidla,
- žárové anemometry – CTA – založené na funkčním vztahu mezi množstvím elektrického proudu pro rozžhavení a ochlazování okolní proudící kapaliny,
- tlakové sondy,
- a další.

Hledaný průtok dostaneme násobením průtočné plochy S a průřezové rychlosti v ve smyslu rovnice:

$$Q = k \cdot u \cdot S = v \cdot S, \quad (4)$$

kde

Q – hledaný průtok,

S – plocha průtočného průřezu,

v – průřezová rychlost,

u – měřená rychlost vykazovaná měřícím systémem,

k – opravný koeficient, jehož hodnota je závislá na geometrických a proudových okrajových podmínkách měrného profilu.

V praktickém využití této metody může nastat velká nepřesnost měření celého systému, způsobená deformacemi rychlostního pole v měrném profilu. Deformace zpravidla bývají způsobené nedodržením podmínek na tvar a rozměry přítokového koryta. Takto vzniklé nepřesnosti lze do jisté míry zohlednit opravným koeficientem, který získáme kalibrací měřícího systému.

2.3.2 Metoda Q/H charakteristiky

Metoda Q/H charakteristiky je jedna ze základních metod při stanovení průtoků [4]. Tato metoda je oproti kontinuální metodě spolehlivější, protože se měří pouze jedna veličina, kterou je výška přepadového paprsku h , respektive hloubku vody H v daném profilu. K měření hloubky dochází v prostoru, kde se nachází kritická hloubka y_k , tedy kde přechází proudění z říčního do bystřinného režimu. Tyto proudové poměry lze využít ke stanovení průtoků, protože průtok je dán funkční závislostí úrovně hladiny protiproudě před vzdouvacím objektem.

Metoda Q/H charakteristiky využívá dvě základní skupiny vzdouvacích prvků – měrné žlaby a měrné přelivy.

3. MĚRNÉ PŘELIVY A ŽLABY

Přelivy a žlaby pracují na principu vzdutí hladiny. Ze stanovené jasné funkční závislosti průtoků Q a úrovně vzduté hladiny protiproudě před vzdouvacím objektem (Q/h charakteristiku u přelivů a Q/H charakteristiku u žlabů).

3.1 Měrné přelivy

Přelivy lze podle tloušťky přelivné stěny rozdělit na:

- ostrohranné přelivy
- jezové nebo přehradní přelivy
- přelivy se širokou korunou
- zvláštní typy přelivů [5].

Vzhledem k použitelnosti pro měření průtoků budou uvedeny dále jenom ostrohranné přelivy, které se používají zvláště pro jejich jednoduchost a nezranitelnost celého měřícího systému. Jejich předností je dlouholetá zkušenost s těmito měřicími objekty, dále pak jejich jednoduchost instalace a obsluhy.

Matematicky lze závislost průtoků na úrovni vzduté hladiny zapsat vztahem:

$$Q = a(h + d)^b + c, \quad (5)$$

kde

h – přepadová výška protiproudě před přelivem

a, b, c, d - koeficienty definující příslušnou funkční závislost

V případě atypických vzdouvacích objektů může být funkční závislost definována i jiným matematickým vztahem.

Nejčastěji používanými měrnými přelivy jsou ostrohranné měrné přelivy s bočním zúžením.

3.1.1 Ostrohranné přelivy s bočním zúžením

Přepad přes ostrou korunu nastává, pokud je splněna podmínka tloušťky přelivné stěny t_l [5]:

$$t_l < 0,66 \cdot h, \quad (6)$$

kde

h – výška přepadového paprsku,

t_l – tloušťka přelivné stěny.

Ostrohranné měrné přelivy jsou vyrobeny nejčastěji z kovového materiálu – nerezového plechu, nebo umělé hmoty. Jejich významným faktorem je, že prostor spodního líce přepadajícího paprsku je zavzdušněný a tím pádem nedochází k pulzaci způsobené rozdílným tlakem nad a pod přepadovým paprskem. [6]

Tyto přelivy se skládají se ze stěny umístěné napříč koryta s různě vytvarovaným výřezem, přičemž návodní hrana stěny přelivu musí být ostrá. Protoklý objem je pak získán z příslušné kalibrační křivky po změření výšky přepadajícího paprsku.

Mezi nejznámější ostrohranné přelivy se řadí [5] :

- obdélníkový (Ponceletův) přeliv,
- přeliv lichoběžníkového výřezu,
- trojúhelníkový (rovnoramenný) přeliv s různým vrcholovým úhlem,
- Thmosonův přeliv – trojúhelníkový přeliv s 90° ve vrcholovém úhlu,
- a další.

Volba typu výřezu ostrohranného přelivu je závislá na mnoha faktorech a požadavcích, zvláště na geometrických podmínkách – poměrech v daném místě instalace, intervalu měřených průtoků a požadavcích na přesnost měření.



Obr. 2) Ostrohranný přeliv trojúhelníkového výřezu



Obr. 3) Ostrohranný přeliv s kombinovaným výřezem

3.2 Měrné žlaby

Měrné žlaby (dále jen MŽ) jsou objekty, které se napevno umísťují do profilu s volnou hladinou. Jejich tvar způsobuje zúžení průtočného profilu. Tímto zúžením dojde ke změně proudění z říčního na bystřinné. Žlaby lze z hydraulického hlediska rozdělit na [7]:

- žlaby s dlouhým hrdlem – proudnice jsou alespoň v části hrdla rovnoběžné,
- žlaby bez hrdla – proudnice nejsou rovnoběžné.

MŽ jsou zvláště vhodné pro měření odpadních vod s velkým obsahem nerozpuštěných látek, protože mezi jejich základní přednosti patří vysoká odolnost vůči zanášení. Mezi další výhody měrných žlabů patří jednoduchý tvar, nízké stavební úpravy, nízký hydraulický spád, jednoduchá kontrola přesnosti měření, nízké požadavky na uklidnění proudění před žlabem a možnost jejich prefabrikace. Mezi jejich nevýhody patří nižší měrný rozsah než u trojúhelníkového přelivu, a ne vždy možný přesný výpočet kanálu, kde je žlab osazený.

Nejčastějšími chybami, které ovlivňují přesnost měření jsou nesprávná instalace prefabrikovaného měrného žlabu (žlab je nakloněný, špatně napojený na přítok, či odtok), nepřesné rozměry u prefabrikátu, nevhodné podmínky na odtoku a výtoku ze žlabu, nesprávná první kalibrace a další. [7]

Matematicky lze potom měřený průtok měrným žlabem popsat rovnicí:

$$Q = a(H + d)^b + c, \quad (7)$$

kde

H – hloubka proudu protiproudě před žlabem,

a, b, c, d - koeficienty definující příslušnou funkční závislost.

V případě atypických měrných žlabů může být funkční závislost popsána jiným příslušným matematickým vztahem.

Volba typu Měrného žlabu je vždy závislá na mnoha faktorech, které toto rozhodnutí významně ovlivňují. Mezi tyto hlavní faktory se řadí rozsah měřených průtoků, použitelný spád, hranice mezi dokonalým a zatopeným režimem proudění, maximální přístupný stupeň zatopení, charakteristika koryta – kanálu, celková přístupná ztráta spádu působená žlabem, možnost prohloubení dna a vytvoření stupně ve dně, požadovaná přesnost měření, zda proud unáší nebo neunáší splaveniny, provozní podmínky – které vyžadují užití stabilních nebo přenosných žlabů a v neposlední řadě ekonomické podmínky. [8]

Mezi nejznámější žlaby se řadí [7] :

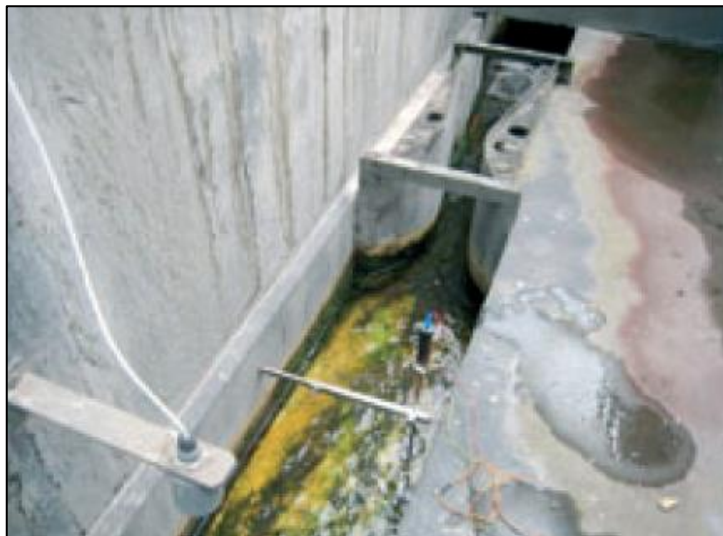
- Venturiho žlaby,
- žlaby typu Saniiri,
- Parshallovy žlaby,
- žlaby typu Palmer-Bowlus,
- žlaby typu Leopold-Lagco,
- žlaby pravoúhlo-lichoběžníkového průřezu,
- a další.

3.2.1 Žlaby typu Venturi

Venturiho žlaby se řadí mezi žlaby bez hrdla – tedy chování jejich proudnic není tak stabilní jako u žlabů s hrdlem. Jeho použití je nepatrně omezeno větší hodnotou minimálního průtoku – při stejné šířce hrdla v porovnání s Parshallovým žlabem, a zároveň větší nejistotou měření - (rozšířená nejistota měření je $\pm 7\%$). [7]

V dřívějších dobách byl žlab typu Venturi hojně používán zvláště pro jeho stavební jednoduchost. Materiálově je žlab většinou prováděn z kovových materiálů – zvláště z oceli a bývá zabetonován na dno koryta. [8]

Hydraulické výpočty jsou totožné s těmi pro Parshallovy žlaby, to ovšem neplatí pro výpočty uklidňovacích a přechodových délek, kde lze v zásadě konstatovat, že Venturiho žlaby potřebují větší uklidňovací a přechodové délky oproti Parshallovým žlabům [7].

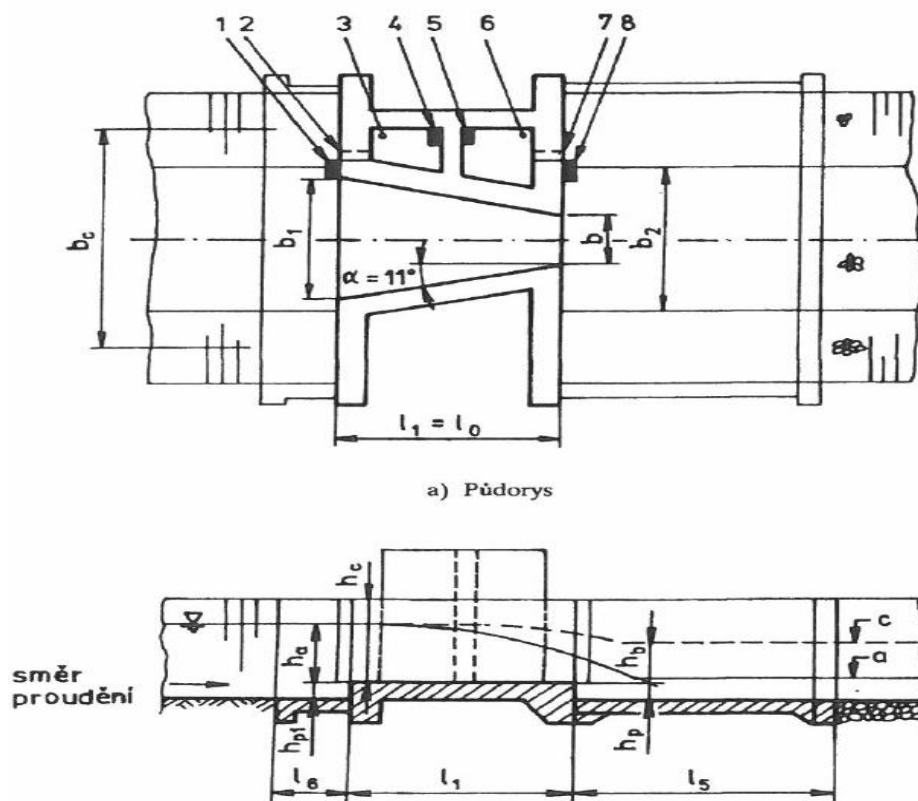


Obr. 4) Protiproudání pohled na Venturiho žlab s šířkou hrdla 150 mm [8]

3.2.2 Žlaby typu Saniiri

Žlaby typu Saniiri mají pravoúhlý příčný průřez, šířku výtakového průřezu v rozpětí od 0,3 m do 1 m a vodorovné dno kde na dolním konci má stupeň (záporný). Žlaby Saniiri jsou z hlediska konstrukce jednodušší než žlaby Parshallovy. Jednoduchost je dána tím, že nemají hrdlo a rozšiřující výtakovou část. Boční stěny žlabu musí být svislé a půdorysně musejí svírat s osou žlabu úhel 11° . Tyto kritéria platí na všechny velikosti žlabů [9].

Žlaby typu Saniiri mohou být budovány z železobetonu, betonu, z betonových prefabrikátů, nebo z duté plechové konstrukce s vyztuženými rohy, která je dále zabetonována do požadovaného místa.



Obr. 5) Schéma žlabu typu SANIIRI [9]

Legenda:

- 1 – vodoteč
- 2 – vtok do spojovací trubky vedoucí k uklidňovací šachtě 3
- 3 – uklidňovací šachta pro měření h_a
- 4 – zařízení na měření hladiny
- 5 – zařízení na měření hladiny
- 6 – uklidňovací šachta pro měření h_b
- 7 – vtok do spojovací trubky vedoucí k uklidňovací šachtě 6
- 8 – vodočet

3.2.3 Žlab typu Parshall [9]

Parshallovy žlaby mají pravoúhlý příčný průřez, skládají se ze zužující vtokové části, hrdla a rozšiřující se výtokové části. Boční stěny musí být svislé a jejich roviny svírají s osou žlabu $10^\circ 19'$, nebo musí mít půdorysné zúžení 1:5 vzhledem k ose žlabu. Boční stěny v hrdle musí být půdorysně rovnoběžné.

Dno je skloněno ve sklonu 3:8 ve směru proudu, což platí pro všechny velikosti Parshallových žlabů. Průsečnice rovin dna, ve vtokové části v hrdle, je koruna žlabu. Výška koruny nade dnem na výtok z hrdla je označována jako výška koruny žlabu h_{pl} .

Boční stěny výtokové části musí být svislé a jejich roviny musí s vodorovnou osou žlabu svírat $9^\circ 28'$, nebo musí mít půdorysné rozšíření 1:6 vzhledem k ose žlabu. Dno je

skloněno směrem proti proudu ve sklonu 1:6, což platí pro všechny velikosti Parshallových žlabů.

Parshallovy žlaby mohou být konstruovány ze dřeva, kamene, železobetonu, sklolaminátu [10], nebo jiného materiálu, v závislosti na místních podmínkách. Malé Parshallovy žlaby smí být zhotoveny z plechu a mohou být používány jako přenosné žlaby.

Parshallovy žlaby nejsou navzájem geometricky podobné, jejich rozměry jsou stanoveny analyticky kromě délky hrdla, výšky koruny a délky výtokové části, které jsou pro všechny žlaby v řadě konstantní.

Tyto žlaby lze rozdělit podle velikosti do tří skupin:

- malé Parshallovy žlaby
- středně velké Parshallovy žlaby
- velké Parshallovy žlaby

Dále se v této práci budeme zabývat pouze středně velkými Parshallovými žlaby.

Za proudění v dokonalém přepadu je považováno proudění, které není ovlivněno změnami dolní hladiny. Při dokonalém přepadu je proudění ve vtokové části žlabu podkritické – říční, hloubka směrem po proudu klesá a v oblasti koruny přechází do kritické hodnoty. Hloubky v hrdle a za korunou ve směru proudu jsou podkritické bystřinné. Dokonalý přepad je zaručen, dokud hladina spodní vody nevystoupá do takové výšky, kdy součinitel zatopení – σ_c přesáhne svoji mezní hodnotu. Součinitel zatopení je definován vztahem:

$$\sigma_c = \frac{h_b}{h_a}, \quad (8)$$

kde

h_a – hloubka horní vody,

h_b – hloubka dolní vody.

Kalibrační testy ukázaly že pro středně velké Parshallovy žlaby leží kritické hodnoty v intervalu 0,55 – 0,78, proto byly stanoveny doporučené průměrné hodnoty, které se pohybují v intervalu 0,6 - 0,7.

V podmínkách nedokonalého přepadu, lze měřit průtok ve smyslu dokonalého přepadu, do součinitele zatopení – $\sigma_c \leq 0,95$. Při větším součiniteli zatopení přestává Parshallův žlab fungovat jako měřící zařízení.

V následující tabulce jsou uvedeny základní rozměry Parshallových středně velkých žlabů.

Tab 1) Rozměry standartních žlabů typu Parshall [9]

| Parshalluv žlab č. | Hrdlo | | | | | Vtoková část | | | | Výtoková část | | | Výška boční stěny |
|-----------------------|-------|-------|------|-------|----------|--------------|-------|-------|-------|---------------|-------|----------|-------------------------|
| | b | l | X | Y | h_{pl} | b_1 | l_1 | l_c | l_s | b_2 | l_2 | h_{p2} | h_c |
| | [m] | | | | | [m] | | | | [m] | | | [m] |
| 1 | 0,152 | 0,305 | 0,05 | 0,075 | 0,015 | 0,40 | 0,610 | 0,622 | 0,415 | 0,39 | 0,61 | 0,012 | 0,60 |
| 2 | 0,250 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 0,78 | 1,325 | 1,352 | 0,900 | 0,55 | 0,92 | 0,072 | 0,80 |
| 3 | 0,300 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 0,84 | 1,350 | 1,377 | 0,920 | 0,60 | 0,92 | 0,072 | 0,95 |
| 4 | 0,450 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 1,02 | 1,425 | 1,454 | 0,967 | 0,75 | 0,92 | 0,072 | 0,95 |
| 5 | 0,600 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 1,20 | 1,500 | 1,530 | 1,020 | 0,90 | 0,92 | 0,072 | 0,95 |
| 6 | 0,750 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 1,38 | 1,575 | 1,610 | 1,074 | 1,05 | 0,92 | 0,072 | 0,95 |
| 7 | 0,900 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 1,56 | 1,650 | 1,683 | 1,121 | 1,20 | 0,92 | 0,072 | 0,95 |
| 8 | 1,000 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 1,68 | 1,750 | 1,734 | 1,161 | 1,30 | 0,92 | 0,072 | 1,00 |
| 9 | 1,200 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 1,92 | 1,800 | 1,836 | 1,227 | 1,50 | 0,92 | 0,072 | 1,00 |
| 10 | 1,500 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 2,28 | 1,950 | 1,989 | 1,329 | 1,80 | 0,92 | 0,072 | 1,00 |
| 11 | 1,800 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 2,64 | 2,100 | 2,142 | 1,427 | 2,10 | 0,92 | 0,072 | 1,00 |
| 12 | 2,100 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 3,00 | 2,250 | 2,295 | 1,534 | 2,40 | 0,92 | 0,072 | 1,00 |
| 13 | 2,400 | 0,600 | 0,05 | 0,075 | 0,230 | 3,36 | 2,400 | 2,448 | 1,632 | 2,70 | 0,92 | 0,072 | 1,00 |

Určení průtoku v proudění dokonalého přepadu ($\sigma \rightarrow \sigma_c$) je průtok možný obecně vypočítat z následující rovnice:

$$Q = C_d \cdot b \cdot h_a^n, \quad (9)$$

kde

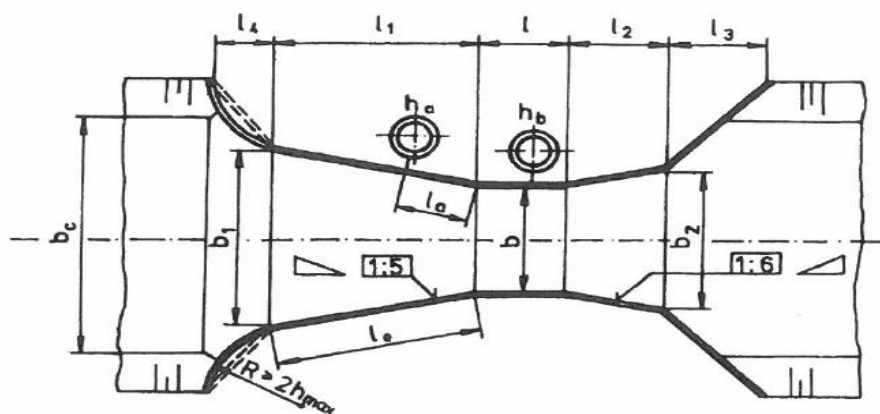
Q – průtok [m^3/s],

B – šířka hrdla [m],

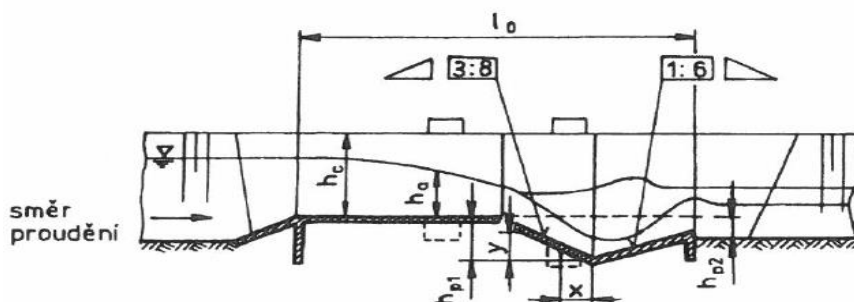
h_a – hloubka horní vody ve vtokové části žlabu [m],

C_d – průtokový součinitel,

n – exponent závisící na b .



a) Půdorys



Obr. 6) Schéma Parshallova žlabu [9]

V následující kapitole se již budeme zabývat modifikovanými Parshallovými žlaby PARS které vyrábí firma PARS Aqua, s.r.o.

3.3 Žlaby PARS

Žlaby PARS vyrábí společnost AQUA, s.r.o. se sídlem v Praze 5, Strojírenská 260. Firma na svém webu [11] uvádí, že žlab je možné instalovat na potocích, odvodňovacích a zavlažujících kanálech, výustích z kanalizací, výustích z čistíren odpadních vod apod. Dále pak popisuje, že široká použitelnost těchto žlabů je dána následujícími výhodami:

- velmi nízká ztráta energie (3 - 4krát nižší ztráta oproti přepadům),
- relativní necitlivost na rozdělení přítokové rychlosti v kanále,
- možnost měření průtoku i při značném zatopení hrdla od dolní vody,
- rychlost ve žlabu je dostatečná, takže nedochází k sedimentaci látek,
- minimální nároky na údržbu,
- vysoký rozsah měřených průtoků,
- dlouhá životnost.

Firma dodává žlaby PARS ve velikostech (P1-P9), základní rozměry a technické údaje nám udává následující tabulka a obrázek:

Tab 2) Technické parametry žlabů PARS P1-P9 [11]

| | | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 |
|--------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q_{\min} | [m ³ /s] | 0,26 | 0,52 | 0,78 | 1,52 | 2,25 | 2,91 | 4,40 | 5,80 | 8,70 |
| Q_{\max} | [m ³ /s] | 6,2 | 15,1 | 54,6 | 168,0 | 368,0 | 598,0 | 898,0 | 1211,0 | 1841,0 |
| a | [-] | 0,0609 | 0,1197 | 0,1784 | 0,3540 | 0,5210 | 0,6750 | 1,0150 | 1,3680 | 2,0810 |
| b | [-] | 1,552 | 1,553 | 1,555 | 1,558 | 1,558 | 1,556 | 1,56 | 1,564 | 1,569 |
| B' | [cm] | 30 | 34 | 39 | 53 | 75 | 120 | 130 | 135 | 150 |
| Z Q_{\min} | [%] | 5,4 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 3,8 | 3,8 | 3,6 | 3,6 | 3,5 |
| Z Q_{\max} | [%] | 4,8 | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,2 | 3,2 | 3,1 | 3,1 | 3,0 |
| h_d/h_a | [-] | 0,6 | | | | | 0,7 | | | |
| m | [kg] | 5,7 | 7,7 | 17,0 | 47,0 | 81,0 | 146,0 | 183,0 | 231,0 | 252,0 |
| W | [cm] | 2,54 | 5,08 | 7,62 | 15,24 | 22,86 | 30,48 | 45,70 | 61,00 | 91,40 |
| C | [cm] | 9,29 | 13,49 | 17,80 | 39,40 | 38,10 | 61,00 | 76,20 | 91,44 | 121,90 |
| D | [cm] | 16,75 | 21,35 | 25,88 | 39,69 | 57,47 | 84,46 | 102,60 | 120,70 | 157,20 |
| E | [cm] | 23,0 | 26,4 | 46,7 | 62,0 | 80,0 | 92,5 | 92,5 | 92,5 | 92,5 |
| L | [cm] | 63,5 | 77,5 | 91,5 | 152,4 | 162,6 | 286,7 | 294,3 | 301,9 | 316,9 |
| S | [cm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| U | [cm] | 24,8 | 26,8 | 49,2 | 69,6 | 87,6 | 101,1 | 101,1 | 101,1 | 101,1 |
| V | [cm] | 30,7 | 35,4 | 39,9 | 54,0 | 80,0 | 100,0 | 120,0 | 140,0 | 180,0 |

kde:

Z – rozšířená nejistota měření pro Q_{\min} a Q_{\max} [%]

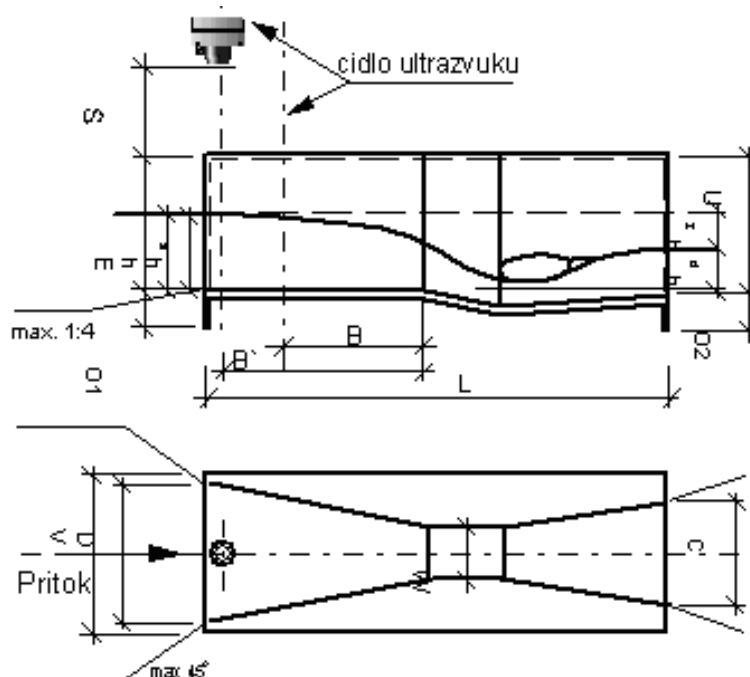
(nejistota na hladině pravděpodobnosti 95%);

m – hmotnost žlabu [kg];

h_d/h_a ...maximální poměr zatopení spodní vodou [-];

h_a – hloubka vody ve vzdálenosti B' před hrdlem [m];

h_d – hl. vody za žlabem (k niveletě dna přední části žlabu) [m].



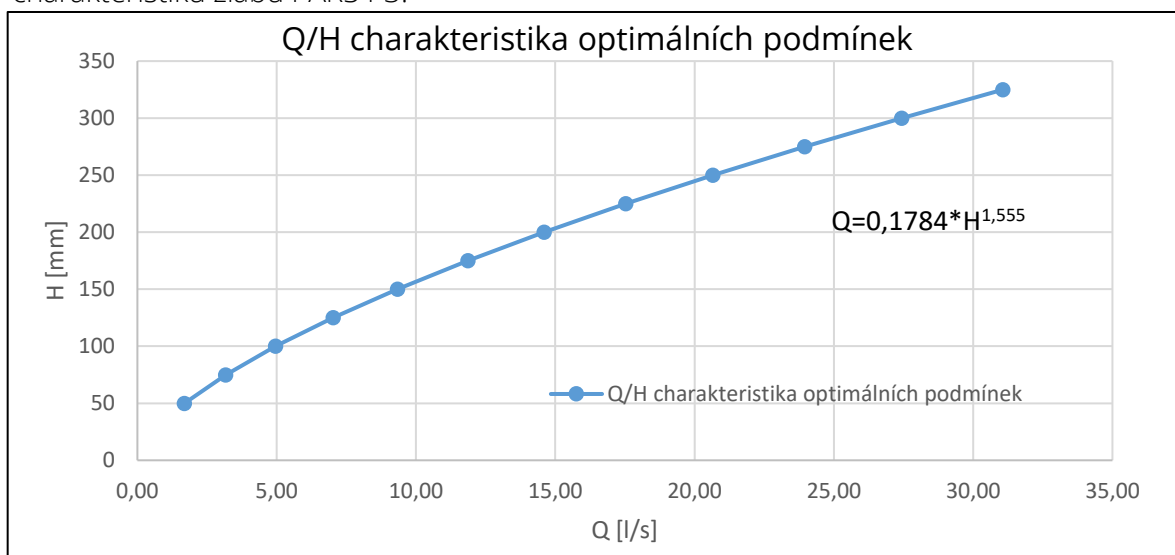
Obr. 7) Schéma žlabu PARS [7]

3.3.1 PARS P3

Praktická část této práce probíhala s využitím žlabu PARS P3, proto ho popíšeme podrobněji. Žlab je vyroben z umělé hmoty – polypropylenu. Průtok žlabem PARS P3 je popsán následující rovnicí, kterou udává výrobce na svém webu [11]:

$$Q = 0,1784 * h^{1,555} \quad (10)$$

Z této rovnice (10) si potom snadno můžeme vynést konsumpční křivku – Q/H charakteristiku žlabu PARS P3.



Graf 1 Q/H charakteristika žlabu PARS P3 udávaná výrobcem

Rozměry a ostatní technické parametry nám udává tabulka (Tab 2) , reálné zobrazení žlabu nám zprostředkují následující obrázky (Obr. 8) a Obr. 9)).



Obr. 8) Žlab PARS P3 při instalaci modelu



Obr. 9) Žlab PARS P3 instalace v praxi

4. TECHNICKÉ, METROLOGICKÉ A PROVOZNÍ POŽADAVKY NA MĚŘÍCÍ SYSTÉMY VYUŽÍVAJÍCÍ ŽLAB JAKO VZDOUVACÍ OBJEKT

V této kapitole popíšeme ve smyslu příslušné technické normy vodního hospodářství [3] části měřicího systému s principem funkční závislosti průtoku na úrovni hladiny využívající žlab jako vzdouvací objekt. Tyto níže jmenované části systému a jejich správná volba – instalace, tedy splnění požadavků na instalaci je základní předpoklad pro správnou funkční způsobilost celého systému.

Měřicí systém se instaluje a navrhuje tak, aby se zajistila dlouhá životnost, spolehlivost, odolnost a aby se nepřekročili největší dovolené chyby měřené veličiny. Vždy musí být ovšem přihlédnuto ke specifickým podmínkám, které se mohou vyskytnout v profilu instalace systému.

4.1 Přítokové koryto

Přítokové koryto vzdouvacího objektu typu žlab musí mít délku rovné minimálně pětinásobku šířky hladiny při maximálním průtoku. Koryto musí být přímé, prizmatické a s konstantním sklonem. Hodnota Freudova kritéria Fr na začátku přítokového koryta musí být menší, nebo rovna hodnotě 0,5 při použitém tvaru rovnice:

$$Fr = \frac{Q_{m\check{r},max}}{S\sqrt{g \cdot y_{m\check{r},max}}}, \quad (11)$$

kde:

g – tíhové zrychlení,

$y_{m\check{r},max}$ – hloubka odpovídající průtoku vzdouvacím objektem při $Q_{m\check{r},max}$,

S – plocha průtočného průřezu.

Pokud je žlab instalován do přítokového koryta, v němž se realizuje nadkritické – bystrinné proudění, musí být zkouškou, nebo výpočtem, prokázáno, že se po instalaci objektu přechod do podkritického režimu proudění bude realizovat ve vzdálenosti větší, než je třicetinasobek H_{max} .

Pokud je vyústění vody realizováno potrubím, jehož průměr je menší než šířka navrženého koryta, musí být (pokud je to zapotřebí) zbudována taková opatření, která potlačí vliv kinetické energie přitékajícího proudu a zajistí homogenitu rychlostního pole před vzdouvacím objektem. Potrubí má být zaústěno symetricky vzhledem k podélné rovině symetrie přítokového koryta.

K přítokovému korytu, nebo potrubí musí být shora umožněn přístup ve vzdálenosti rovné třinásovkou maximální hladiny vzduť – H_{max} . Tento volný přístup umožňuje provést posouzení funkční způsobilosti měřicího systému.

4.2 Vzduvací objekt – žlab

Vzdouvací objekt musí být vyroben z materiálu, který zabezpečí jeho pevnost, tvarovou stálost, nepropustnost a odolnost proti korozi. Povrch vzdouvacího objektu být bez nerovností, hladký a kvalitativně odpovídající minimálně hladkému cementovému povrchu. Vzduvací objekt je možné zhotovit také z válcovaného plechu, nebo umělé hmoty. Materiál musí odolat znečištění, které se vyskytují v dopravované vodě protékajícím měrným profilem. Na povrchu objektu by nemělo docházet k tvorbě inkrustů, nebo usazování biologického materiálu. V případě usazování sedimentů v prostorů protiproudě před vzdouvacím objektem musí být provedeny takové provozní opatření, aby těmito změnami nebyly ovlivňovány naměřené hodnoty měřícím systémem. Změny provozních teplot nesmí způsobit deformace tvaru vzdouvacího objektu. Vzduvací objekt musí být bez průsaků a netěsností, musí trvale odolávat tlaku, případně vzlaku vody.

Podélná rovina symetrie vzdouvacího objektu musí být identická s podélnou osou přítokového koryta minimálně na délce definované předchozí kapitolou 4.1. Každý vzdouvací objekt musí být popsán v normě, typizační směrnici, metrologickým předpisem, nebo jiným dokumentem – výzkumnou zprávou, či odborným posudkem. Dále musí být jasně půdorysně stanovený měrný profil (nebo jeho mezní hranice) měření hloubky vzdutého proudu H . Současně musí být jednoznačně předepsána referenční – výchozí výšková úroveň vzdouvacího objektu pro správné měření hloubky proudu H .

Jak již popisuje kapitola (3.2) Měrné žlaby, každému vzdouvacímu objektu je možné stanovit jednoznačnou funkční závislost průtoku – Q na úrovni vzduté hladiny – H . Matematicky lze pak závislost zapsat v podobě rovnice (7).

4.3 Odtokové koryto

Odtokové koryto za vzdouvacím objektem, musí být dostatečně kapacitní v rozsahu měřených průtoků. V měrném profilu musí být přednostně zajištěno dokonalé proudění objektem, které nesmí být ovlivněno úrovní dolní hladiny. V případě že k ovlivnění dojde je potřeba stanovit jednoznačnou funkční závislost průtoku na vzduté hladině předepsaným postupem. Tento postup je předepsaný pro systematické, nebo nesystematické ovlivnění.

4.4 Snímač hladiny a vyhodnocovací jednotka

Snímač hladiny je možné umístit v profilu koryta v boční uklidňovací šachtici spojené krátkým uklidňovacím potrubím s korytem – jak je například vidět na Obr. 5) Schéma žlabu typu SANIIRI. Měřící rozsah snímače musí být zvolen s ohledem na maximální a minimální úroveň hladiny vody v definovaném měrném profilu. Rozsah snímače by neměl být větší než je dvojnásobek rozdílu mezi těmito dvěma úrovněmi, tak aby byly zajištěny metrologické návaznosti.

Metrologické návaznosti jsou podmíněny chybou měření a rozlišovací schopností snímače hladiny. Chyba měření úrovně hladiny udávána výrobcem použitého snímače nesmí být

větší než $\pm 0,25 \%$ z jeho rozsahu, maximálně však $\pm 4 \text{ mm}$. Rozlišovací schopnost snímače nesmí překročit hodnotu $0,1 \%$ z jeho rozsahu, maximálně však $\pm 2 \text{ mm}$.

Snímače hladiny se rozdělují na dvě základní skupiny:

- kontaktní snímače hladiny a
- bezkontaktní snímače hladiny.

Na obě tyto skupiny snímačů jsou kladeny specifické nároky z hlediska provozních teplot, materiálu, z kterého mohou být zkonstruovány, místa instalace a dalších.

Vyhodnocovací jednotka musí odolávat teplotám okolního prostředí, které lze očekávat. Změna teploty okolního prostředí nesmí mít vliv na metrologické vlastnosti vyhodnocovací jednotky. Pro jednoznačnou identifikaci musí být na krytu vyhodnocovací jednotky uvedeno výrobní číslo, nebo identifikační číslo udávané výrobcem. Jednotka musí být v provedení elektrického krytí minimálně IP 65. Další požadavky na vyhodnocovací jednotku, jako je např. údaje o okamžitém průtoku, protékajících objemech, odlehlostech hladiny od referenční a dalších nalezneme podrobněji popsané v odvětvové technické normě vodního hospodářství [3].

Kapitola 4 TECHNICKÉ, METROLOGICKÉ A PROVOZNÍ POŽADAVKY NA MĚŘÍCÍ SYSTÉMY VYUŽÍVAJÍCÍ ŽLAB JAKO VZDOUVACÍ OBJEKT pojednává o optimálních podmínkách jmenovaných částí měrného systému. Tyto požadavky ovšem nejsou vždy zcela splněny a v provozech se setkáváme s jejich nesplněním. Důležité je podotknout že tyto jmenované požadavky mají veliký vliv na funkční způsobilost celého systému.



Obr. 10)

Vyhodnocovací jednotka



Obr. 11) Ultrazvukový snímač hladiny

5. MOTIVACE A CÍL PRÁCE

S postupným vývojem jsou požadovány přesnější a spolehlivější výsledky, to platí i v kategorii měření průtoků napevno instalovanými měřidly se systémem s volnou hladinou, kde posuzujeme funkční způsobilost, stanovování průtoků a proteklých objemů. Mezi tyto měřidla řadíme i měrné Parshallovy žlaby, které jako i ostatní měřidla slouží ke stanovování odebraných, či vypouštěných množství, a tedy vedou k udávání cen proteklých objemů ve značně širokých okruzích – skupin, jako jsou například zemědělství, vodohospodářství, průmysl, a další.

Prvním základním cílem práce bylo získat Q/H charakteristiky měrného žlabu PARS P3 při optimálních podmínkách instalace pod různými sklony, které byly zvoleny. Následně pak do modelu vložit přítokové potrubí a zkoumat změny průtokové charakteristiky měrného žlabu PARS P3.

Dalším cílem bylo stanovit opravné koeficienty k příslušným sklonům měrných charakteristik – tedy navrhnout vhodnou korekci a rozsah možné korekce.

6. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této práce probíhala od listopadu 2016 do února 2017 v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Bylo provedeno měření s měrným žlabem PARS P3.

Tato kapitola má sloužit jako popis praktické části bakalářské práce. Bude popsána měřicí trať, použitá měřicí technika, postup samotného měření a modifikace modelu. Na závěr bude popsán postup zpracování dat a zhodnocení výsledků.

6.1 Laboratoř

V této kapitole popíšeme měrnou trať, na které byla praktická část této bakalářské práce provedena – naměřena. Seznámíme se s měrnou trátí, jejími základními komponenty a možnostmi.

6.1.1 Měrná trať

Měření proběhlo na měrném žlabu 40, žlab je umístěn v budově F Laboratoře vodohospodářského výzkumu. Žlab je sklopný, prosklený, šíře 0,414 m, délce 12,5 m a výšce stěn 0,4 m. Při běžném měření je maximální kapacita žlabu 40 l/s.



Obr. 12) sklopný žlab 40



Obr. 13) Sklopný žlab 40

Do měrného žlabu 40 je přiváděna voda pomocí soustavy čerpadel, které jsou zásobeny vodou z podzemní nádrže laboratoře. Z čerpadel je potom pomocí rozvodných potrubí

voda dopravena do uklidňovací nádrže měrného žlabu 40 a přepadá pomocí Thomsonova trojúhelníkového přelivu.



Obr. 14) Thomsonův přeliv s vyrovnávací nádrží



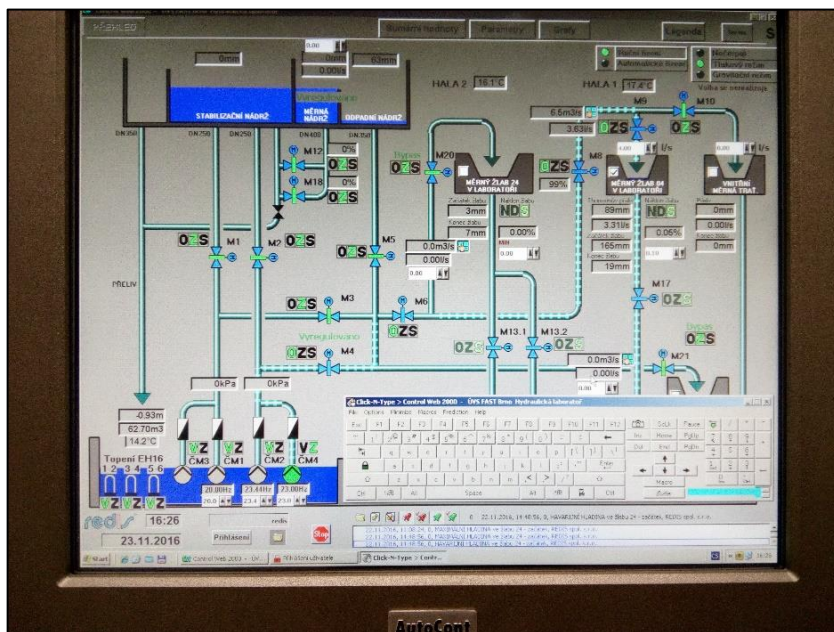
Obr. 15) Nerezová děrovaná síta

Aby se uklidnila energie přepadající vody po pádu z Thomsonova přelivu do trati žlabu 40 je zde nainstalován pár nerezových děrovaných sít (Obr. 15). Vlnění hladiny za sítě je potlačeno polystyrénovou deskou.



Obr. 16) Polystyrénová tlumící deska

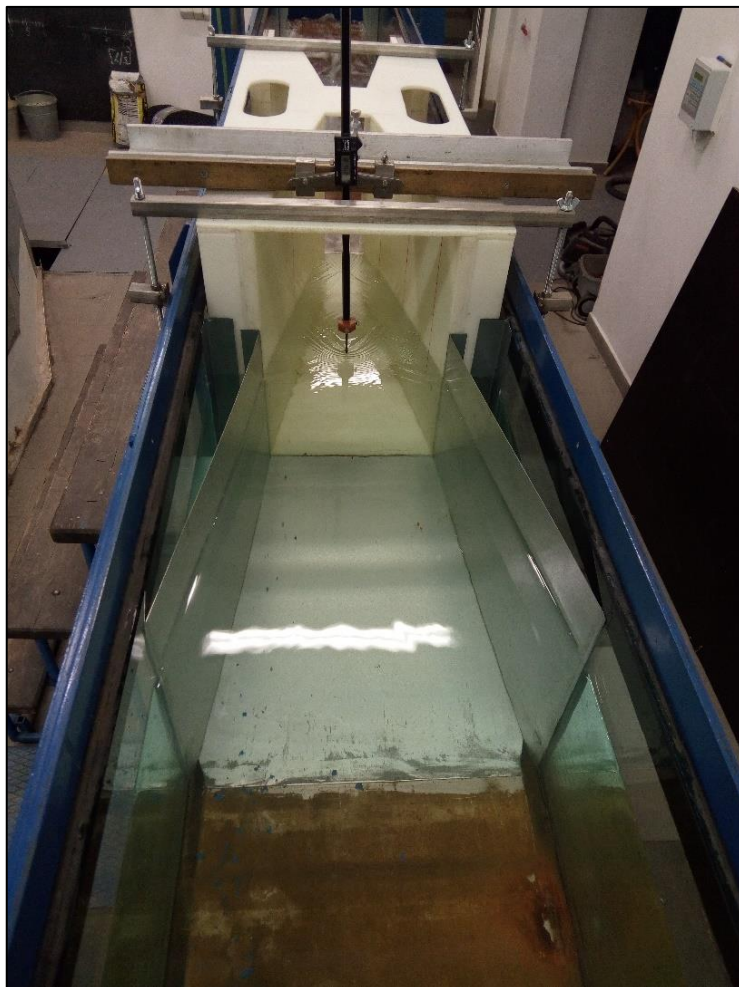
Požadovaný průtok je zadán do systému a ten automaticky zvolí čerpadlo, případně čerpadla, která se zapnou a dodají požadovaný průtok.



Obr. 17) Vizualizace laboratorní trasy, ovládací systém laboratoře

Do měrného žlabu 40 byl nainstalován vzdouvací objekt – žlab typu PARS P3, který byl osazen 3 m před koncem žlabu 40. Mezi MŽ PARS P3 a sklopný žlab 40 byly umístěny zavazovací křídla, která měla za úkol zlepšit nátok na MŽ PARS P3.

Na MŽ byla umístěna ocelová konzole, na které bylo připevněno digitální ruční posuvné měřítko, na kterém byly zjišťovány výšky vzdutí hladiny před žlabem PARS P3.



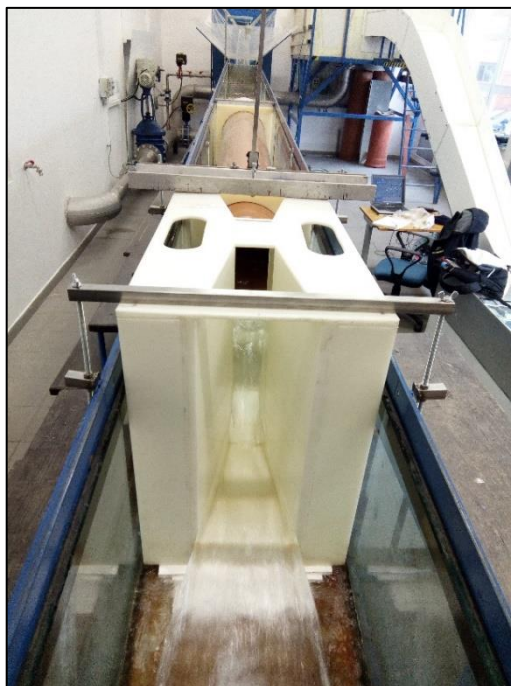
Obr. 18) Upevnění měrného žlabu PARS P3 spolu s hrotovým digitálním měřítkem a zavazovacími křídly

6.1.2 Použitá měřicí technika

Jak již popisuje kapitola 3.3.1 při měření byl využit MŽ PARS P3, ten byl umístěn do sklopného žlabu 40 ve vzdálenosti 3 m protiproudě od konce. Požadované průtoky byly nastavovány do systému laboratoře z připojeného notebooku do místní sítě, nebo z velínu laboratoře

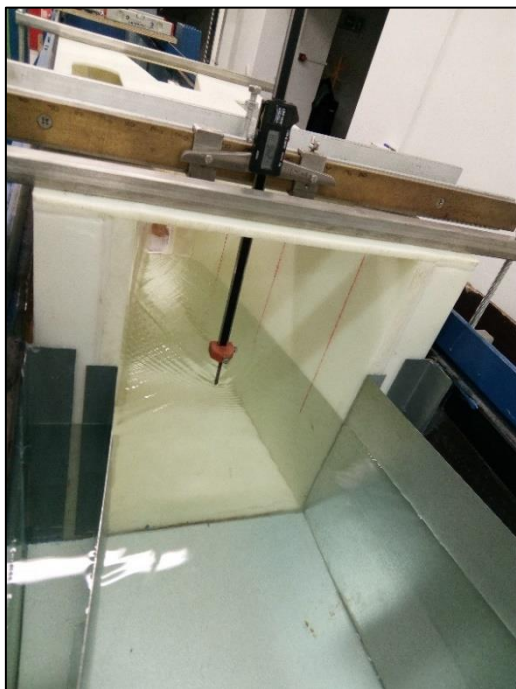


Obr. 19) Řídící počítač laboratoře, velín laboratoře

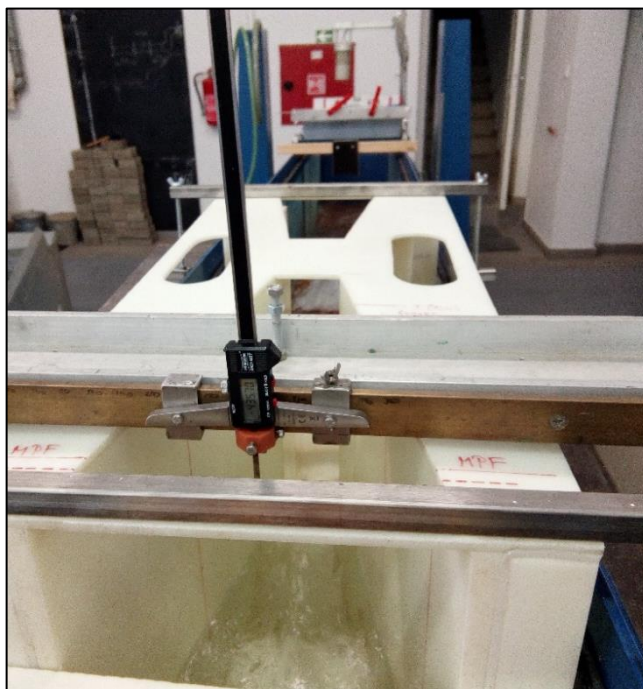


Obr. 20) Upevnění žlabu PARS P3 do sklopného žlabu 40

Ke měření výšky vzduté hadiny sloužilo hrotové měřítko – hladinoměr, který patří do skupiny kontaktních měřidel.



Obr. 21) Hrotové měřítko



Obr. 22) Hrotové měřítko

K získání okamžitého průtoku, který protékal žlabem sloužil magneticko-indukční průtokoměr DN 150, který je instalován protiproudě před vyrovnávací nádrží spolu s vyhodnocovací jednotkou, která je připevněna na zdi laboratoře u magneticko-indukčního průtokoměru.



Obr. 23) Indukční průtokoměr DN 150



Obr. 24) vyhodnocovací jednotka série 99

6.2 Postup měření a modifikace modelu

6.2.1 Postup měření

Na začátku každého měření byl nastaven sklon sklopného žlabu na požadovanou hodnotu a bylo urovnáno a vycentrováno hrotové měřítko do nulové hodnoty – tedy na úroveň dna hrdla žlabu PARS P3, aby bylo možné odečítat hodnotu vzduť hladiny H .

Následovalo zadání požadovaného průtoku do systému laboratoře. Po zadání požadovaného průtoku v automatickém režimu laboratoře systém sám zapnul čerpadlo (čerpádla) a vyrovnal aktuální protékající průtok do průtoku požadovaného. Automatický systém byl používán pouze k přepínání čerpadel, jinak byl volen režim manuální, který zabezpečil chod čerpadla (čerpadel) na požadované frekvenci a omezil do značné míry rozkolísání průtoku, protože v automatickém režimu systém delší dobu vyhodnocuje a upravuje parametry čerpadel a tím čerpaný průtok.

Po zadání požadovaných parametrů – průtoku bylo potřeba nechat celou měrnou trať s protékajícím průtokem stabilizovat, aby se měřená hloubka vzduť žlabu PARS P3 ustálila. Ustálení vzduť hladiny bylo měřeno hrotovým digitálním posuvným hladinoměrem. Konstrukce hladinoměru obsahuje aretační šroub, kterým je možné hrot měřidla stabilizovat na výškové úrovni – tedy na hladině a pozorovat změny vzduť hladiny.

Pokud se hladina výškově neměnila byl celý systém měřící tratě stabilizován a bylo možné odečíst výšku – hloubku vzdutí.

Po odečtení hloubky bylo potřeba odečíst aktuální průtok, který žlabem protékal, k tomu sloužila vyhodnocovací jednotka indukčního průtokoměru. Po odečtení průtoku byla ještě jednou přeměřena výška vzdutí před žlabem. Pokud byla změřena „stejná“ hloubka vzdutí, bylo možné změnit požadovaný průtok a celý postup opakovat pro jiný požadovaný průtok. Pokud hloubka vzdutí byla odlišná, bylo potřeba systém nechat stabilizovat.

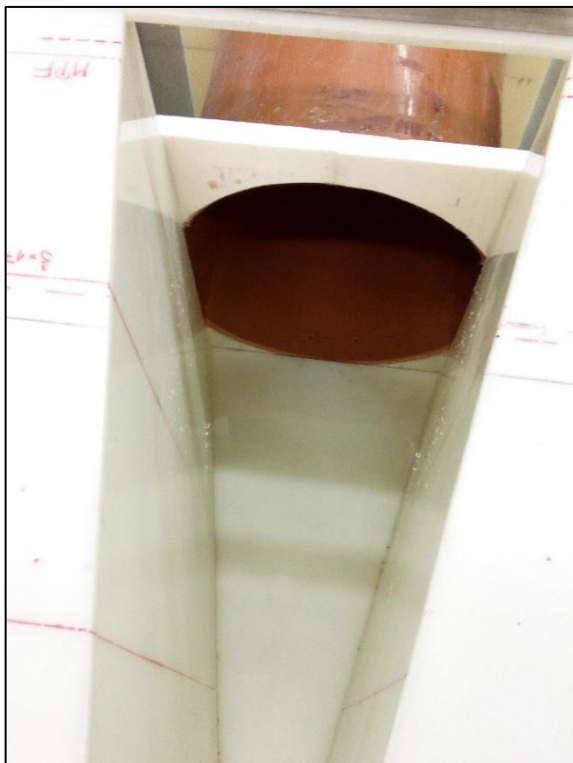
6.2.2 Modifikace

Modifikace celého měření se dá rozdělit do dvou částí. První modifikace měření spočívala ve změření Q/H charakteristiky samotného žlabu PARS P3 za nulového sklonu a bez přítokového potrubí na žlab. Jak je vidět na obrázku Obr. 18), žlab PARS P3 byl vsazen do sklopného žlabu 40 a k vytvoření podmínek uváděných v dokumentech výrobce sloužila zavazovací křídla spolu s dnovým náběhem. Takto byla získaná Q/H charakteristika, která byla považovaná za výchozí stav a byly s ní porovnávány ostatní varianty – tedy reprezentuje optimální a požadovaný stav měrného systému. V této modifikaci byly také změřeny Q/H charakteristika při různém sklonu dna MŽ.

Druhá modifikace modelu spočívala v doinstalování přívodního potrubí DN 300 do sklopného žlabu 40 před MŽ PARS P3. Q/H charakteristika byla naměřena při nulovém sklonu jak dna MŽ, tak přívodní trubky a následně byly prováděny změny sklonu přívodní trubky. Za pomoci naklápění hydraulického žlabu 40 a případným podkládáním měrného žlabu PARS P3 bylo dosaženo těchto kombinací:

Tab 3) Vzniklé kombinace z modifikací modelu

| Modifikace | BEZ TRUBKY | BEZ TRUBKY | BEZ TRUBKY | BEZ TRUBKY | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM | SPOTRUBÍM |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| SKLON POTRUBÍ [%] | - | - | - | - | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0,55 | 1,09 | 1,64 | 2,19 | 3,28 | 4,37 |
| SKLON PARS P3 [%] | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



Obr. 25) Napojení přítokového potrubí na MŽ PARS P3



Obr. 26) Nátok na přítokové potrubí



Obr. 27) Stupnice náklonu sklopného žlabu 40



Obr. 28) Celá soustava PARS P3, přítokové potrubí s nátokem

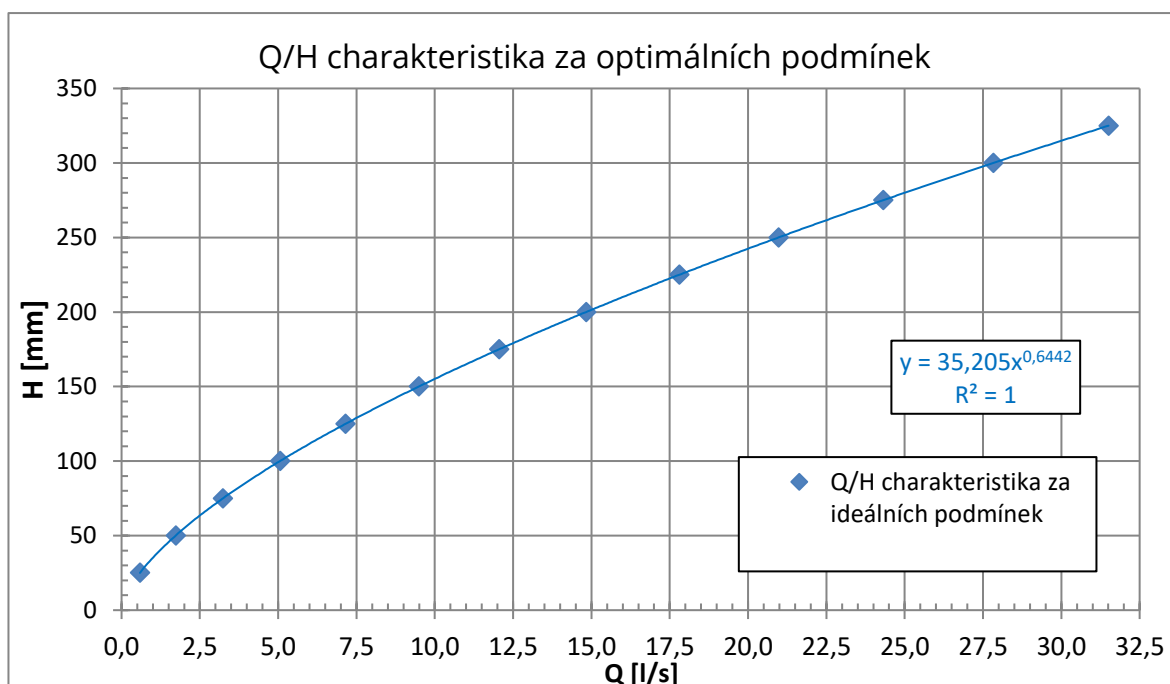


Obr. 29) Podložení odtokové strany MŽ pro dosažení požadovaného sklonu dna MŽ

6.3 Zpracování dat, výsledky

Kompletní zpracování všech výsledků probíhalo v prostředí softwaru Microsoft Office Excel 2016. Zpracování výsledků bylo provedeno ve dvou etapách. První etapa zpracování probíhala společně s vlastním měřením v laboratoři. V této první části byly získané konkrétní naměřené bodové hodnoty. Tyto naměřené body byly proloženy příslušnou matematickou funkcí – spojnici trendu. U malých sklonů mocninná funkce, u větších sklonů polynommická funkce většinou 4 a 5 ° (6°)

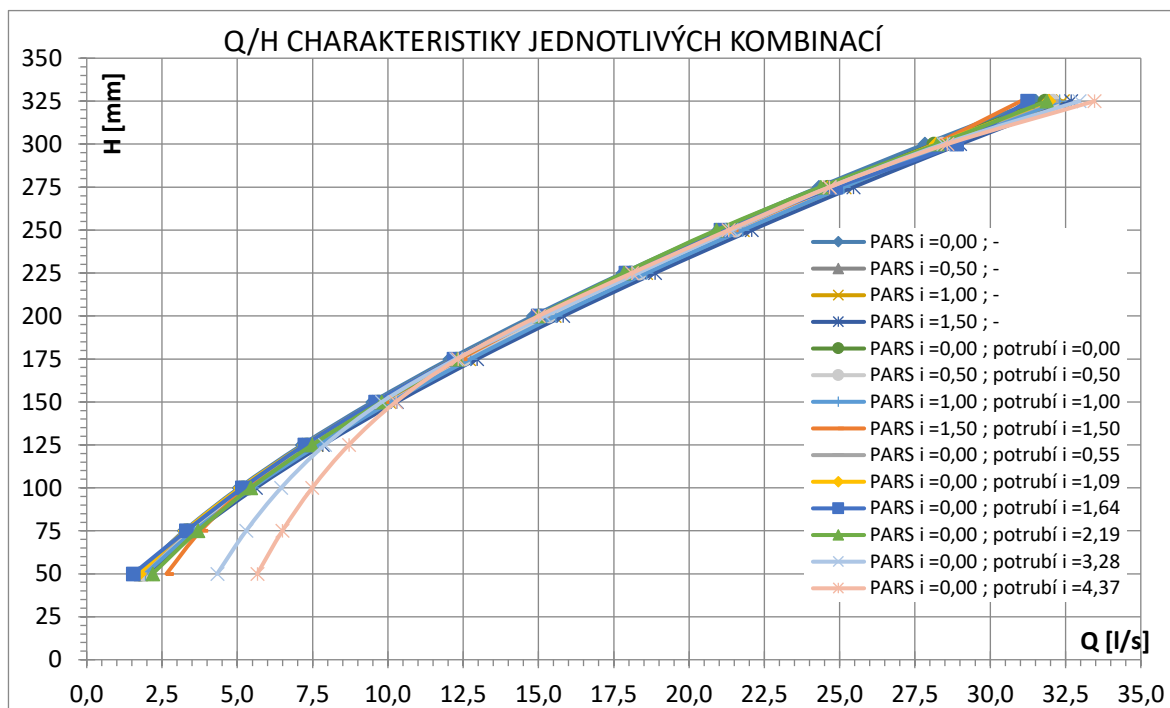
V druhé etapě zpracování byly stanoveny procentuální odchylky všech získaných kombinací a byly sestaveny grafy ukazující na hodnoty procentuálních odchylek od optimálního stavu MŽ.



Graf 2 Q/H charakteristika měrného žlabu PARS P3 za optimálních podmínek

6.3.1 Q/H charakteristiky

Následující graf (Graf 3) ukazuje všechny naměřené kombinace Q/H charakteristik. Na grafu je vidět, že modifikace a sklony mají velký vliv na jednotlivé Q/H charakteristiky při menších průtocích.



Graf 3 Q/H charakteristiky jednotlivých kombinací

Protože ale v takovémto množství Q/H charakteristik není graf zcela čitelný, jsou jednotlivé Q/H charakteristiky zařazeny do příloh této práce (P1 P2 P3), v těchto přílohách jsou obsaženy hodnoty naměřených modelových hodnot v laboratoři, které jsou následně proloženy příslušnou matematickou funkcí.

Ze získané funkční závislosti byly stanoveny hodnoty H a Q . Výčet takto získaných hodnot reprezentuje následující tabulka (Tab 4). Například pro konkrétní případ, kdy MŽ PARS P3 je ve vodorovné poloze a přítokové potrubí ve sklonu 0,55 % byla stanovena funkční závislost:

$$Q = 34,635 \cdot H^{0,6459}, \quad (12)$$

kde Q je hledaný průtok a H výška vzduté hladiny. Spolehlivost proložení naměřených hodnot byla kontrolována pomocí hodnoty spolehlivosti – R^2 , která zjednodušeně říká, do jaké míry proložená funkce odpovídá skutečným hodnotám. Čím více se hodnota spolehlivosti blíží 1, tím je proložení pravděpodobnější.

Tab 4) Hodnoty získané z funkční závislosti Q/H po proložení

| H [mm] | Q [l/s] | H [mm] | Q [l/s] |
|-----------|------------|-----------|------------|
| 0 | 0,000 | 70,42 | 3,000 |
| 25 | 0,604 | 97,94 | 5,000 |
| 50 | 1,766 | 127,27 | 7,500 |
| 75 | 3,308 | 153,26 | 10,000 |
| 100 | 5,163 | 177,01 | 12,500 |
| 125 | 7,294 | 199,14 | 15,000 |
| 150 | 9,673 | 219,99 | 17,500 |
| 175 | 12,280 | 239,80 | 20,000 |
| 200 | 15,101 | 258,76 | 22,500 |
| 225 | 18,121 | 276,98 | 25,000 |
| 250 | 21,332 | 294,56 | 27,500 |
| 275 | 24,724 | 311,59 | 30,000 |
| 300 | 28,290 | 328,13 | 32,500 |
| 325 | 32,022 | 344,21 | 35,000 |

6.3.2 Procentuální odchylky

Ze získaných dat bylo možné stanovit absolutní procentuální odchylku k výchozímu stavu měrného žlabu PARS P3 za optimálních podmínek. Tato procentuální odchylka je stanovena podle vztahu:

$$\left[\left(\frac{x_{\text{posuzovaná}}}{x_{\text{referenční}}} \right) - 1 \right] \cdot 100, \quad (13)$$

Kde

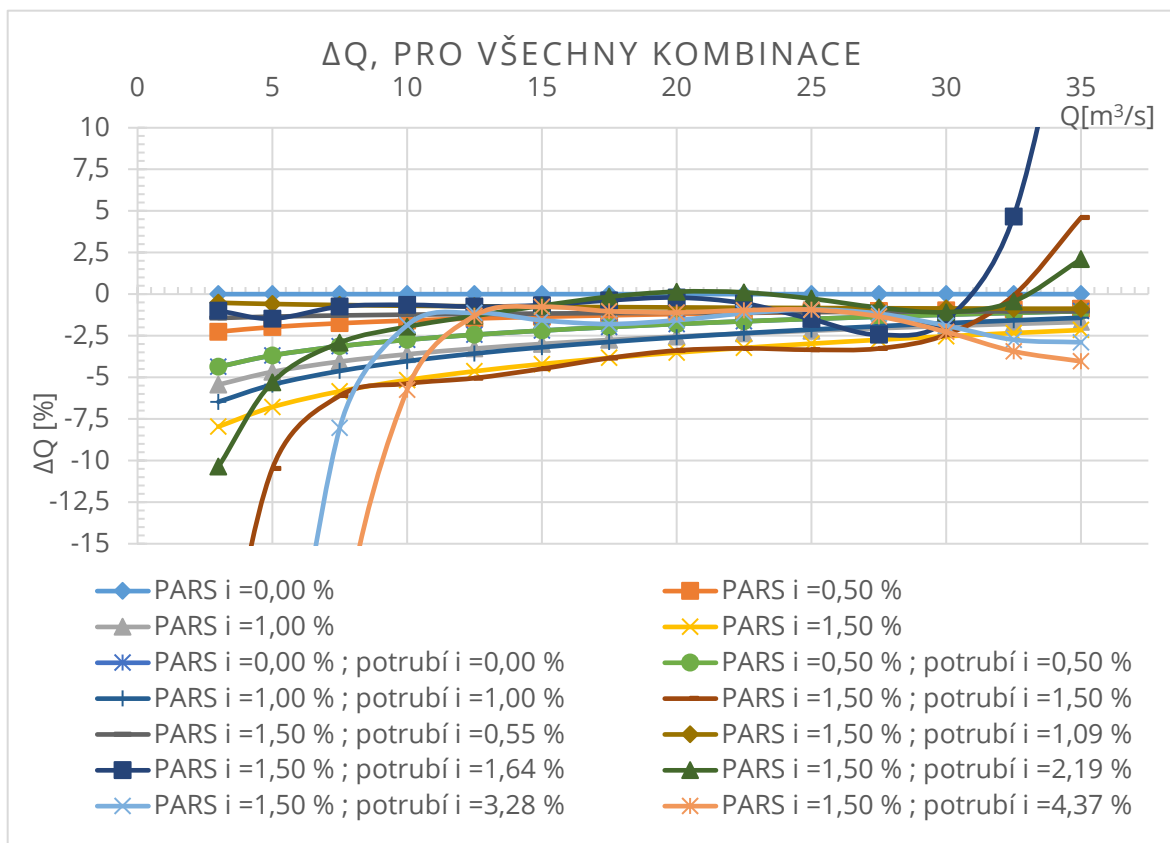
$x_{\text{posuzovaná}}$ – posuzovaná veličina

$x_{\text{referenční}}$ – hodnota referenční

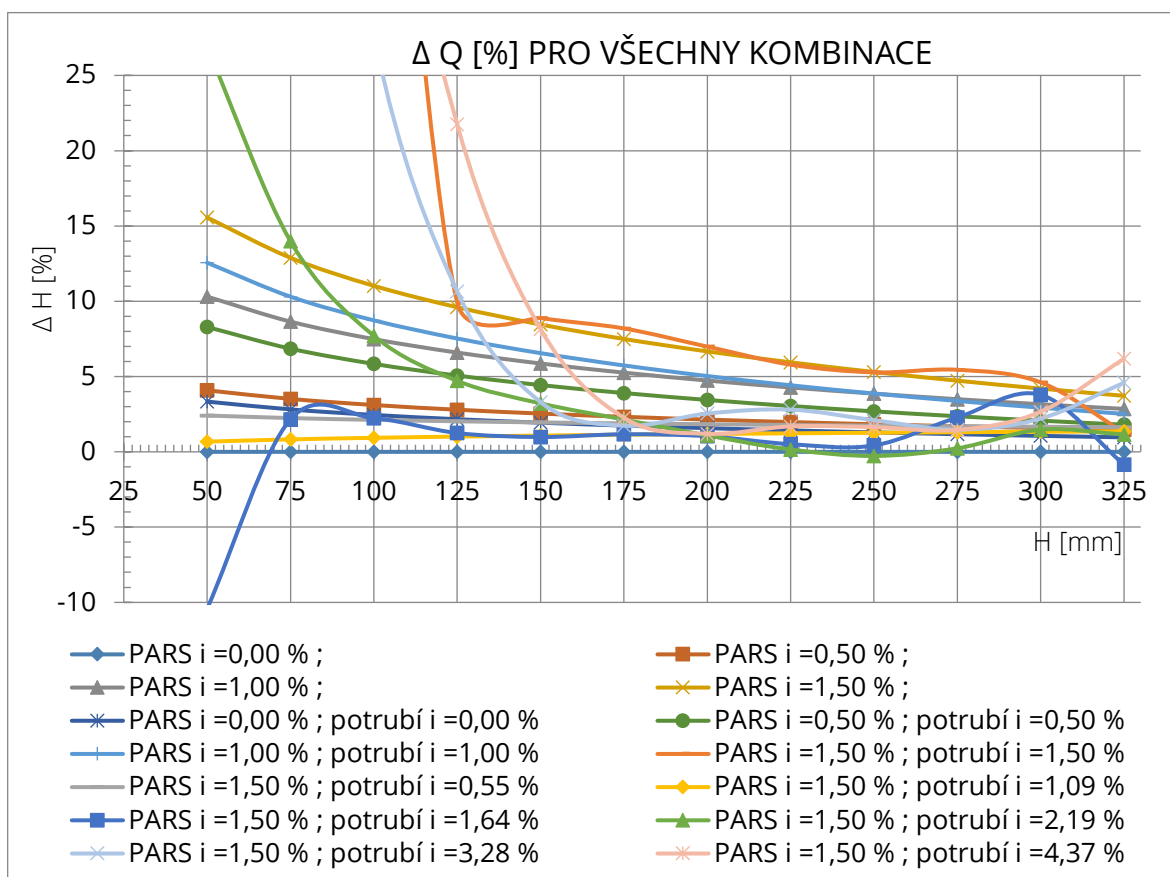
Pokud jsou hodnoty právě posuzované veličiny větší než referenční, procentuální odchylka vyjde kladná, pokud je posuzovaná veličina menší, než referenční procentuální odchylka vychází záporná.

Všechna takto zpracovaná data vyjadřuje příloha P4 . Po vypočtení odchylek bylo možné sestavit grafy, které nám procentuální odchylky vizuálně zpřístupní.

6.3.3 Grafy ΔH , ΔQ

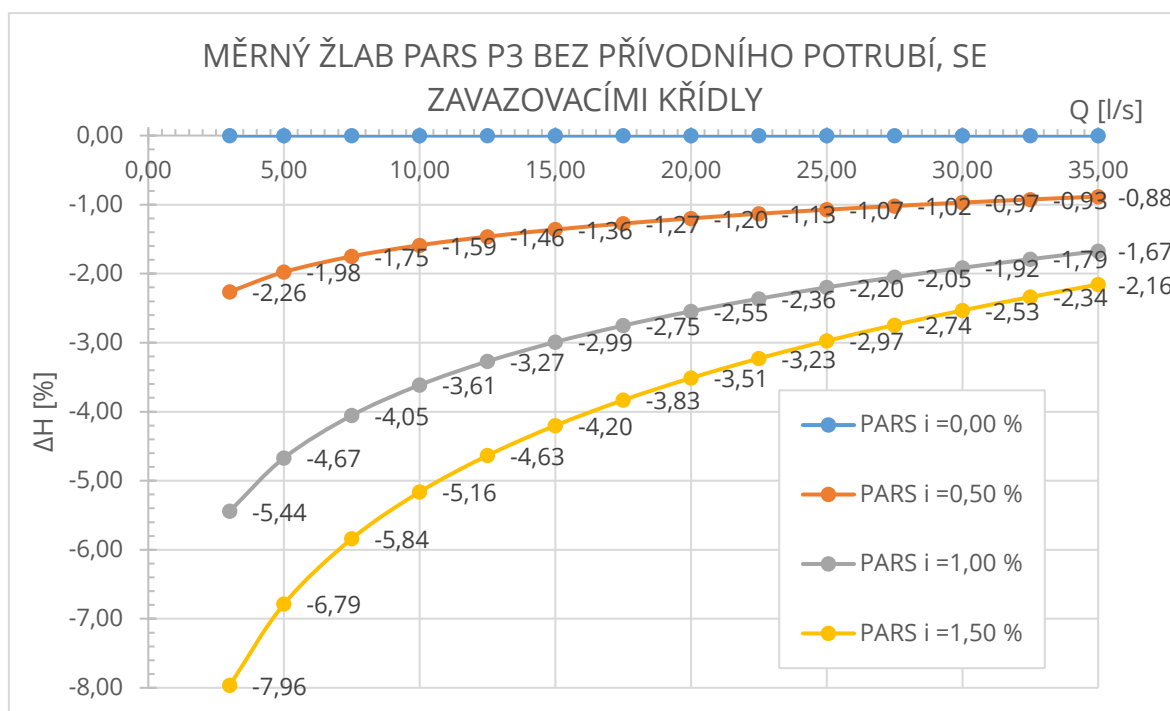


Graf 4 ΔQ , pro všechny kombinace

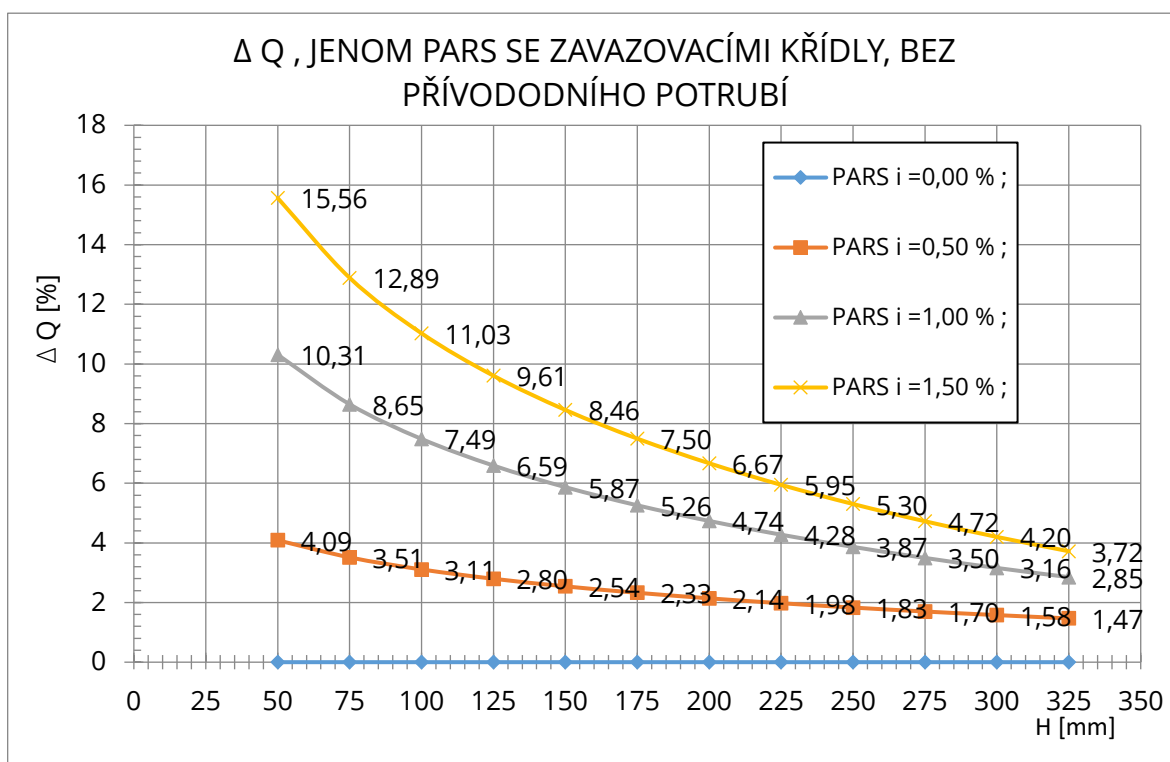


Graf 5 ΔQ , pro všechny kombinace

Na grafech (Graf 4, Graf 5) jsou vidět odchylky Q/H charakteristik jednotlivých kombinací, ke stanoveným H nebo Q . Nyní si rozebereme jednotlivé kombinace postupně.



Graf 7 ΔH , MŽ PARS P3 za optimálních podmínek, pod různými sklony

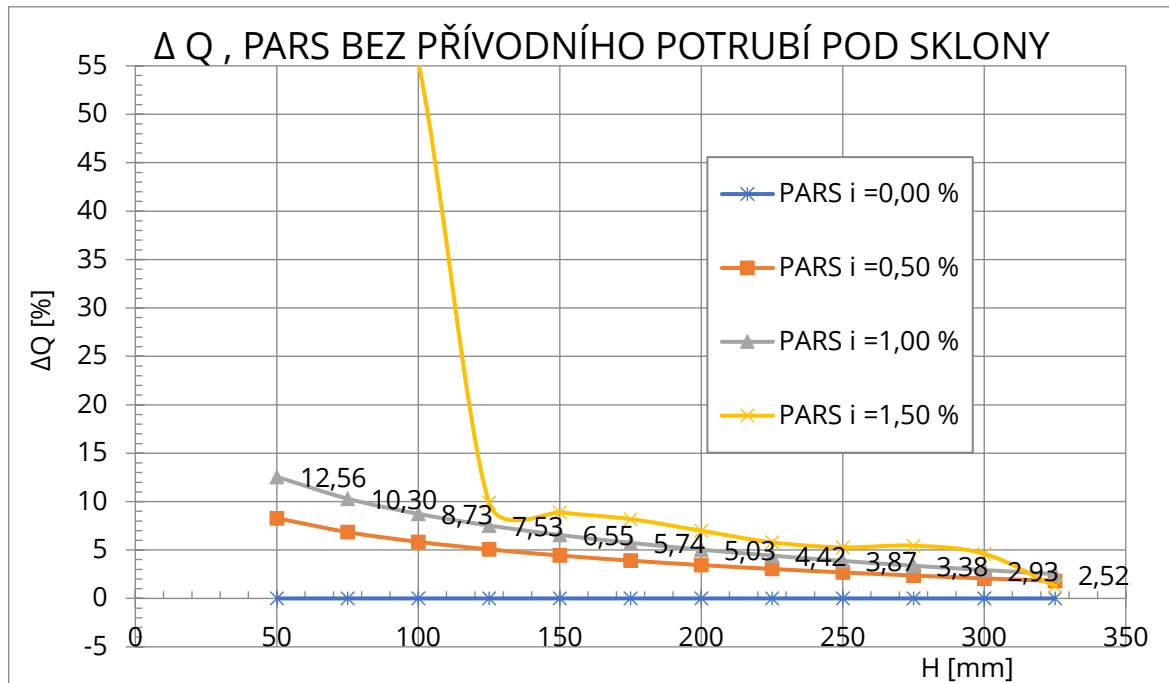


Graf 6 ΔQ , MŽ PARS P3 za optimálních podmínek, pod různými sklony

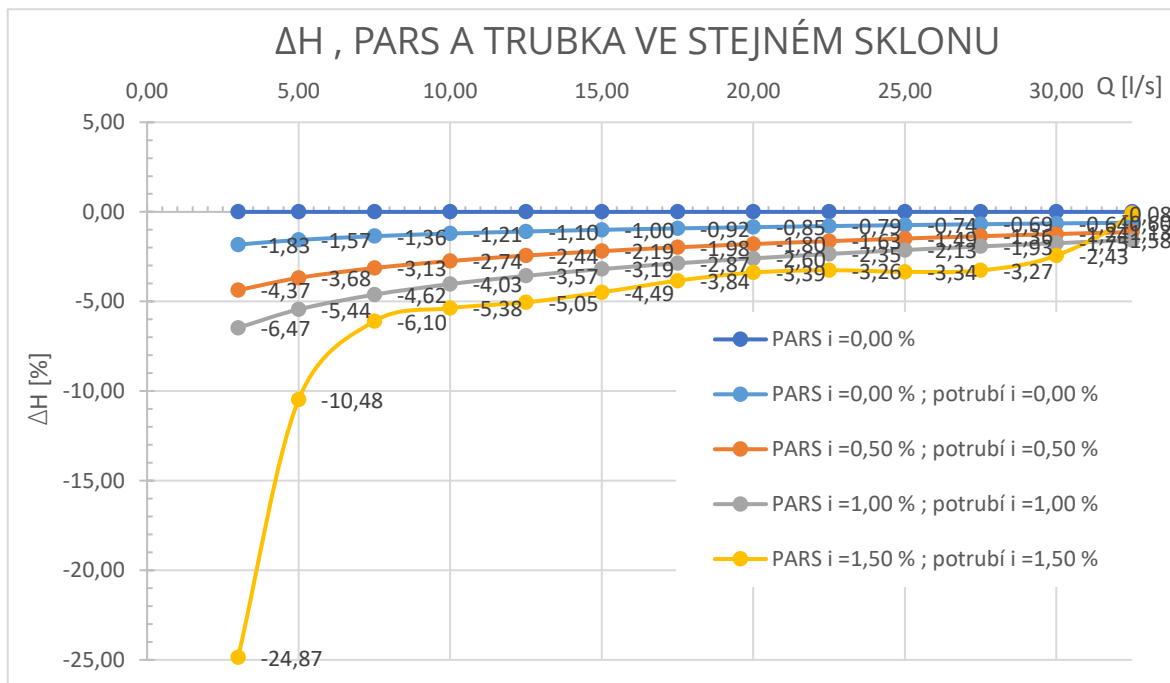
Z těchto grafů (Graf 7, Graf 6) je zřetelně vidět vliv sklonu samotného MŽ PARS na jeho Q/H charakteristiku. Pokud sklon narůstá, narůstá i odchylka od referenčních hodnot, s tím, že u větších Q jsou odchylky menší a u malých Q jsou odchylky výrazně větší. Z toho vyplývá, že i menší odchylka od vodorovné polohy MŽ při instalaci budou zdroji chyb. Tyto

chyby vedou k nepřesnostem celého měřicího funkčního systému, pokud systém není na kalibrován na konkrétní situaci.

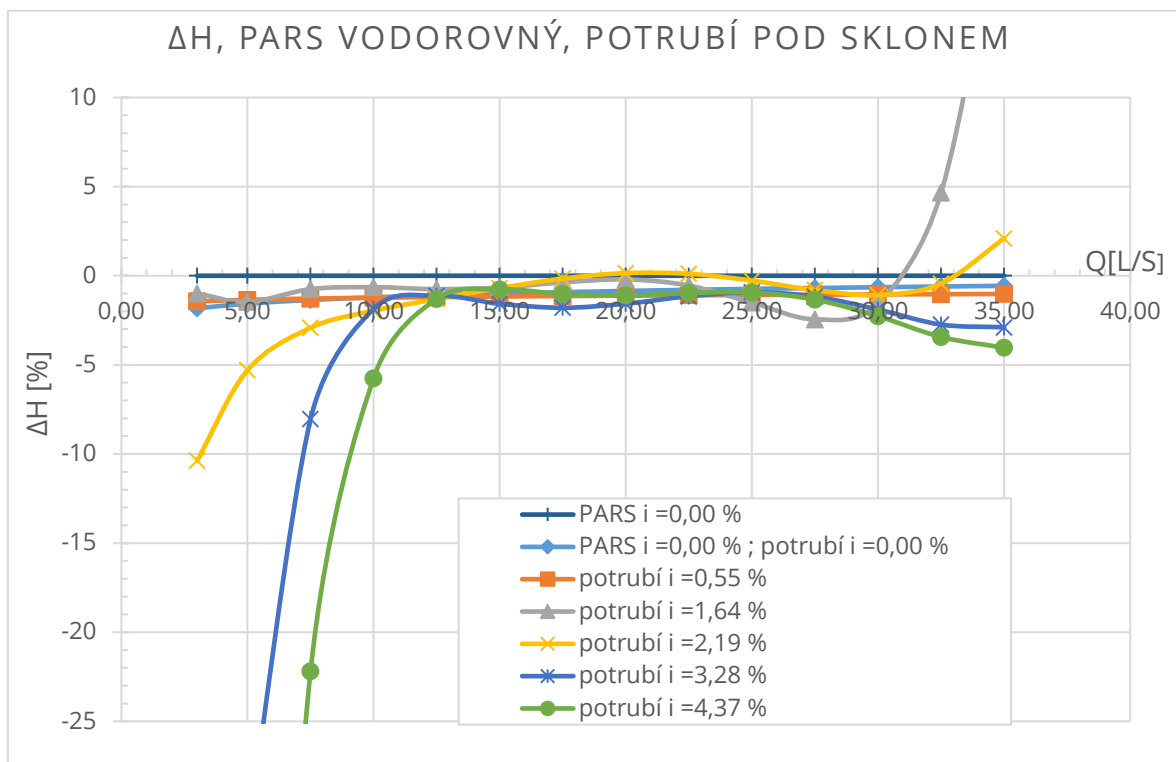
Měření, která byla prezentovaná do této části kapitoly jsou výsledkem měření, která byly zpracovány navíc, tedy nejsou požadavkem zadání práce. Vyhodnocení grafů, které reprezentují napojení přívodního potrubí na MŽ PARS P3, tyto měření stále také nepopisují zadání práce, ale je zajímavé si je trochu přiblížit.



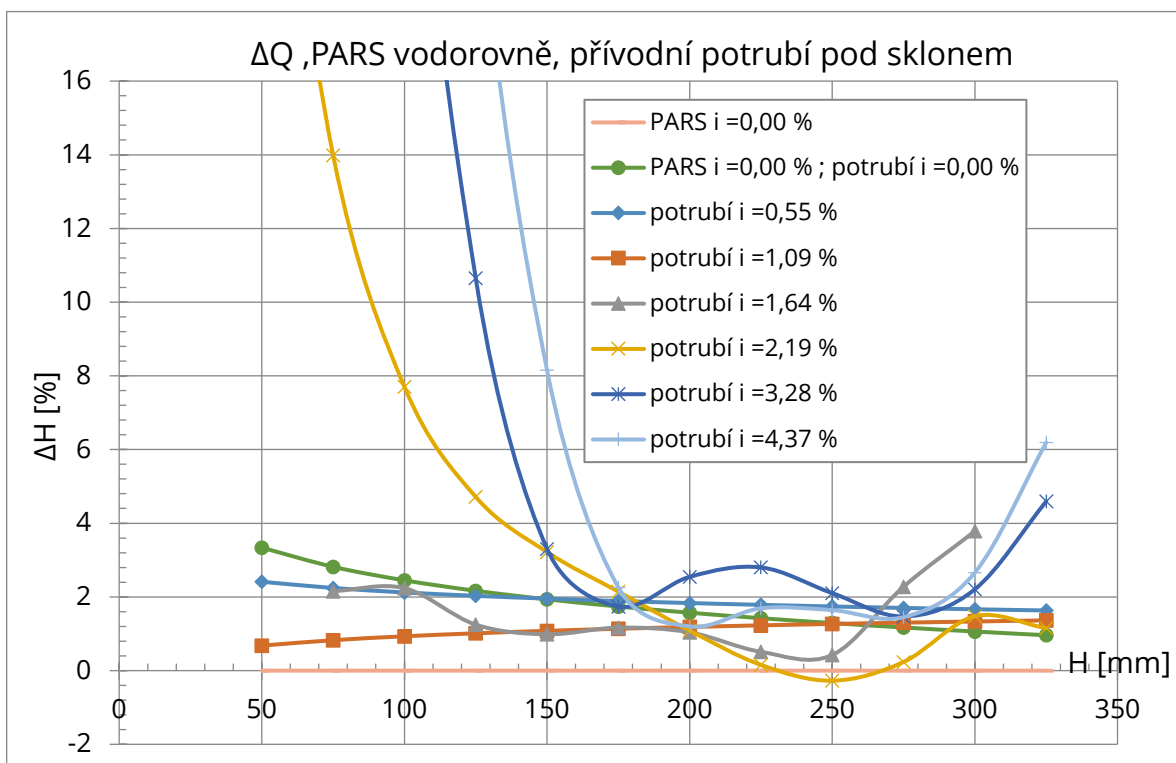
Graf 9 ΔQ , PARS bez přívodní potrubí ve sklonu



Graf 8 ΔH , PARS a přívodní potrubí ve stejném sklonu



Graf 11 ΔH , PARS vodorovný, potrubí pod sklony



Graf 10 ΔQ , PARS vodorovně, přívodní potrubí pod sklony

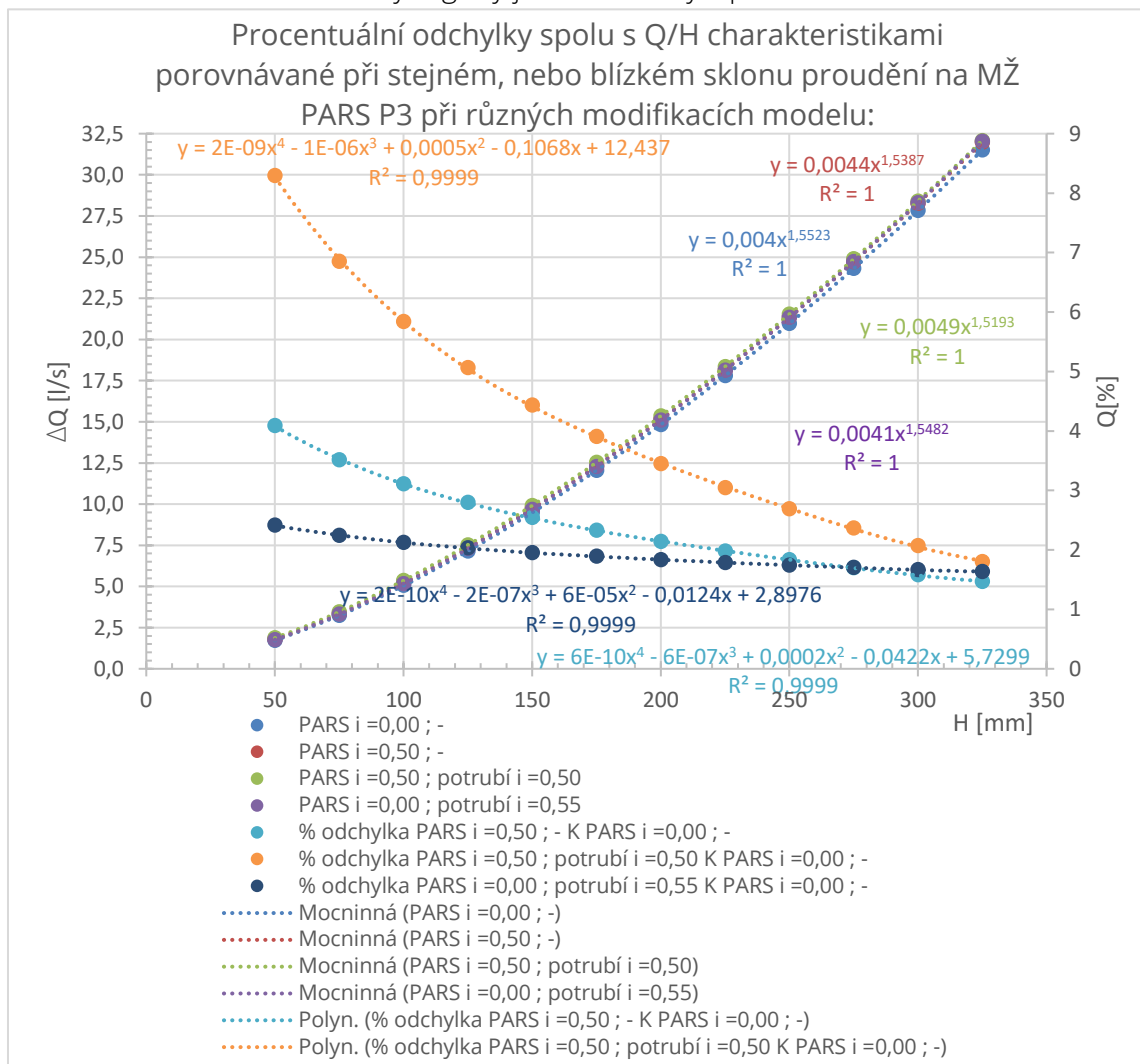
Grafy (Graf 9, Graf 8) popisují Q/H charakteristiky, které vzniknou při naklonění celého systému (MŽ i potrubí).

Po připojení přírodního potrubí na MŽ PARS P3 se ve stejném sklonu celého systému odchylky ještě navýšily oproti situaci bez přírodního potrubí. Například u sklonu 1 %, $Q=15$ l/s je u prvního případu odchylka -4,634 % u druhého případu již -5,048 %. Toto platí pro všechny sklony v naměřeném rozsahu.

Dále se již budeme zabývat situací, která se zcela v souladu zabývá zadáním této bakalářské práce.

Při měření modifikace, kdy MŽ PARS byl ve vodorovné poloze a přítokové potrubí ve sklonech byly zjištěny následující skutečnosti. Procentuální rozdíl Q se do hodnoty sklonu přírodního potrubí 1,09 % zmenšuje. Po sklonu 1,09 % se Q/H charakteristika chová jinak, je to způsobené měnícím se Freudovým kritériem, které začíná dosahovat kritické úrovně a proudění v přítokovém potrubí přechází z říčního do bystrinného režimu

Pro lepší přehlednost u jednotlivých kombinací byly vytvořeny grafy, které nám zprostředkují vizuální pohled velikosti procentuální odchylky na závislosti sklonů, Q/H charakteristik a modifikace. Tyto grafy jsou obsaženy v příloze P8 .

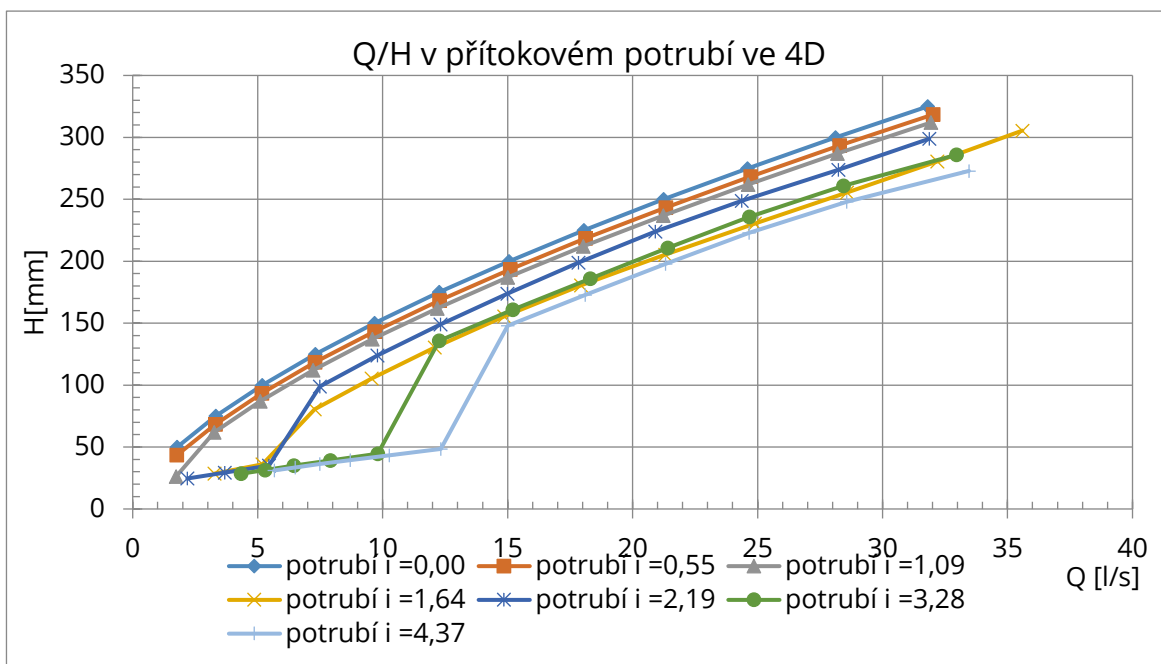


Graf 12 Procentuální odchylky spolu s Q/H charakteristikami porovnáváné při stejném, nebo blízkém sklonu proudění na MŽ PARS P3 při různých modifikacích modelu

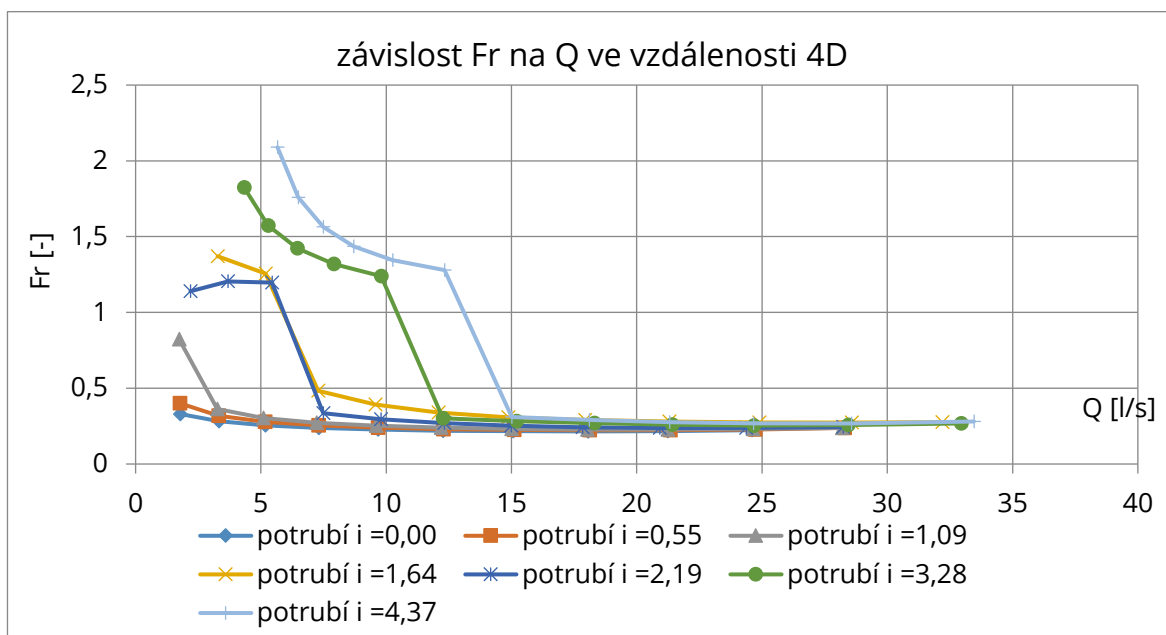
6.3.4 Freudovo kritérium

Do práce byla zahrnuta snaha definovat proudění v přítokovém potrubí pomocí bezrozměrného Freudova kritéria (Fr).

Freudovo kritérium bylo spočítáno ve smyslu rovnice (11). Byla spočítána průtočná plocha pomocí známé výšky hladiny a světlého průměru potrubí. Fr bylo počítáno pro každou kombinaci zvlášť a v protiproudnicích vzdálenostech před vstupem do MŽ, které odpovídaly násobkům vnitřního průměru přívodního potrubí (2D, 4D, 6D, 8D). Výpočty jsou uvedeny v příloze P9. Vypočtené Freudovo kritérium bylo vztaženo k samotnému Q , H . Následně pak k ΔQ . Vše nám zprostředkují následující grafy (Graf 13, Graf 14, Graf 15).

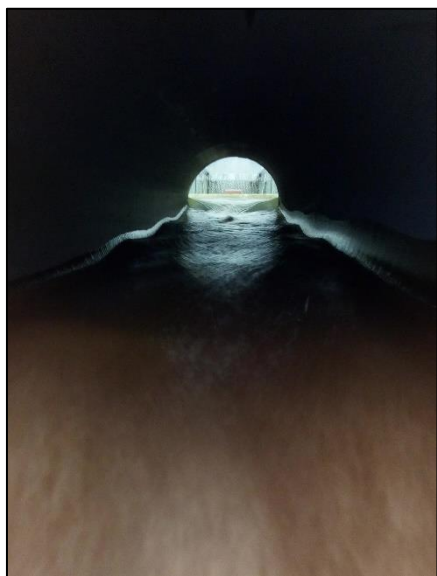


Graf 14 Závislost Q na H ve vzdálenosti 4D

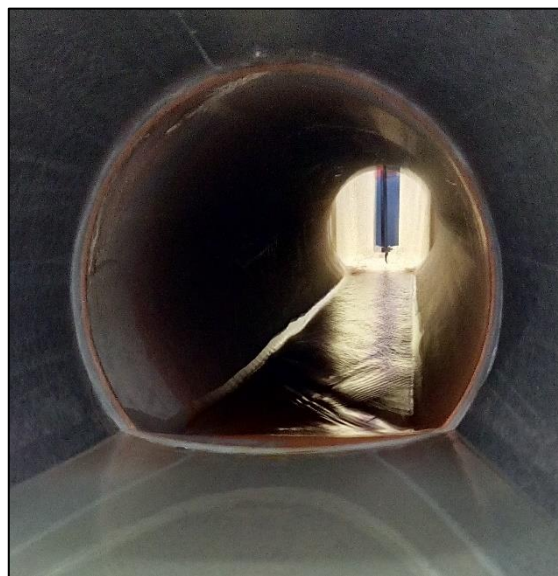


Graf 13 Závislost Freudova kritéria na Q ve vzdálenosti 4D.

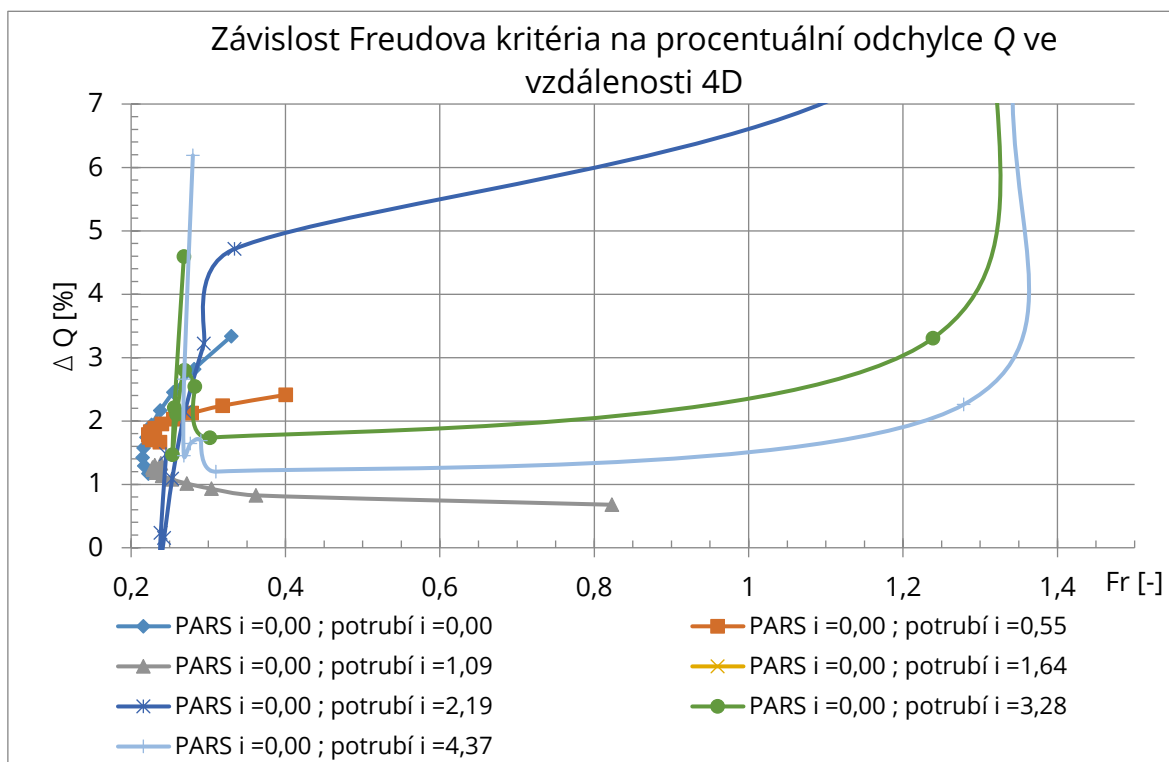
Náhly „skok“ u sklonu přívodního potrubí 1,09 % a vyšších, který je patrný v grafech (Graf 13, Graf 14) je způsobený při narůstání průtoku tím, že proudění přechází z říčního proudění do říčního proudění



Obr. 30) Přechod z říčního do bystřínného proudění



Obr. 31) Bystřínné proudění $Q=3,5\text{l/s}$, sklon potrubí 4,37 %



Graf 15 Závislost Freudova kritéria na ΔQ ve vzdálenosti $4D$

Z výše uvedeného grafu (Graf 15) je patrné, že se nepodařilo najít jednoznačnou funkční závislost ΔQ na Fr . Příčinou je že se nestačilo vytvořit rovnoměrné ustálené proudění, což je ale pravděpodobně v souladu s obvyklým instalováním v praxi.

7. ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Z předložených výsledků z předchozí kapitoly (6.3 Zpracování dat, výsledky) byly prezentovány Q/H charakteristiky jednotlivých modifikací. Q/H charakteristiky ukazují že v pásmu malých H 50-150 mm jsou průtoky v rozmezí 3-10 l/s, v pásmu středních H 150-250 mm jsou v Q v rozmezí 10-21 l/s. V pásu vysokých H 250-325 mm průtoky nabývají hodnot 21- 33,5 l/s.

Z těchto pásů je nejvyrovnanější střední část, je to vidět na grafu (Graf 3), případně v příloze této práce (P5).

Z grafů odchylek je patrné, že veliké odchylky od referenční hodnoty působí samotná modifikace systému, zdali je přítomno přírodní potrubí, či jestli je MŽ ve vodorovné poloze. Tento problém je vidět na grafu (Graf 12), nebo na dalších grafech zařazených v příloze P8 . Při zavedení přírodního potrubí stoupne ΔQ . Například u srovnání modifikace nulového sklonu MŽ PARS, který je pokládán za referenční hodnotu a MŽ s přírodním potrubím také pod nulovým sklonem se ΔQ zvětšila v oblasti malých průtoků a malých hloubek až o 3,34 % a ΔH na hodnotu -1,83 %.

Můžeme konstatovat, že při zvyšujícím se sklonu přírodního potrubí, nebo celé soustavy se ΔQ i ΔH více zvětšují v oblasti malých H (přibližně do 100 mm) a malých průtoků (do 7,5 l/s), to platí pro všechny sklony. Po překročení sklonu 1,64 % dále narůstají odchylky v oblasti malých Q a H , ale také začínají narůstat v oblasti velkých Q a H .

Výsledkem je, že měřicí systémy zatížené chybou způsobené vlivem sklonu přírodního potrubí mohou za normální podmínky vykazovat výsledky s přijatelnou chybou, ovšem při narůstajících, či zmenšených průtocích měrným systémem budou vykazovat chybné hodnoty, které budou mimo interval přijatelnosti.

8. ZÁVĚR

Bakalářská práce vysvětluje a shrnuje výsledky výzkumu, který probíhal v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Vysokého učení technického v Brně v období od listopadu 2016 do února 2017. Výzkum probíhal na měrném žlabu PARS P3, který byl osazen do měrné trati šířky 0,414m

V úvodu práce je čtenář seznámen se základními metodami měření průtoků a stanovování Q/H charakteristik na měrných žlabech. Je vysvětlena metoda Q/H charakteristiky, která bude dále použita v druhé části práce.

Praktická část se zabývá postupem měření a popisuje modifikace, na kterých byly vlastní měření uskutečněny. Dále se praktická část zabývá zpracováním a vyhodnocením naměřených dat. Na závěr jsou prezentovány získané poznatky.

Práce splnila očekávané cíle. Podařilo se naměřit Q/H charakteristiky příslušných modifikací a stanovit z nich procentuální odchylky k optimálnímu stavu. Nepodařilo se ale nalézt jednoznačnou funkční závislost zpracovaných odchylek k Freudově bezrozměrnému kritériu (jak je patrné z grafu (Graf 15)). Pokud by se jednoznačná funkční závislost našla, daly by se stanovit procentuální odchylky pomocí Freudova kritéria a aplikovat je na další možné modifikace.

Na závěr můžeme konstatovat, že při zvyšování sklonu přívodního potrubí na měrný žlab se mění Q/H charakteristika. Odchylky ΔQ i ΔH narůstají zvláště v oblasti malých průtoků a výšek vzdutí u všech sklonů. Následující tabulkou si můžeme vyjádřit maxima a minima ΔQ a ΔH , kterých nabývají za určitých sklonů. Zbytek je uveden v příloze P4 .

Tab 5) Maximální kladné a záporné ΔQ a ΔH

| | | SKLON PŘÍVODNÍHO POTRUBÍ [%] | | | | | |
|------------|-----|------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,55 | 1,09 | 1,64 | 2,19 | 3,28 | 4,37 |
| | | [%] | | | | | |
| ΔQ | MAX | -1,02 | 0,52 | 22,02 | 2,10 | -0,93 | -0,94 |
| | MIN | -1,44 | -0,88 | -2,44 | -10,37 | -31,66 | -72,66 |
| ΔH | MAX | 2,41 | 1,36 | 3,79 | 26,88 | 63,60 | 48,06 |
| | MIN | 1,63 | 0,68 | -10,42 | -0,27 | 1,47 | 1,20 |

V Brně dne 26. 5. 2017

Dominik Naiser
autor práce

9. CITOVANÁ LITERATURA

- [1] Pars aqua s.r.o.: *Fotodokumentace* [online]. 2004 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.pars-aqua.cz/fotodokumentace.html>
- [2] SLOVÁČEK, Antonín. *Měření průtoku plynů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Beneš, PhD.
- [3] TNV 25 9305. *MĚŘÍCÍ SYSTÉMY PROTEKLÉHO OBJEMU VODY V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU*. Únor 2012. Brno: Český metrologický institut, 2012.
- [4] ŽOUŽELA, Michal. *Měřicí systémy proteklého množství vody užívané v profilech s volnou hladinou: Metrologie, 3/2008, str 10-16*. b.r.
- [5] ŠULC, Jan a Jan JANDORA. *HYDRAULIKA: MODUL 1*. Brno, 2006. Studijní Opora. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [6] ZEINER, Pavel. *Využití integrační metody pro měření průtoku za nerovnoměrného proudění v prostoru konfuzoru měrného žlabu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph. D.
- [7] Pars aqua s.r.o.: Měrné žlaby. *Pars aqua s.r.o.* [online]. 2004 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.pars-aqua.cz/clanek13.html>
- [8] ŽOUŽELA, Michal a Petr SÝKORA. Měření průtoků a proteklého množství odpadních vod: Část II. - Měřicí systémy průtoků a proteklých odpadních vod užívané v profilech s volnou hladinou. *SOVAK Časopis oboru vodovodů a kanalizací*. Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1, 2010, **19**(11), 7-11. ISSN 1210-3039.
- [9] ČSN ISO 9826 (25 9342). *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech: PARSHALLOVY ŽLABY A ŽLABY TYPU SANIIRI*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [10] Intermountain Environmental, Inc.: Monitoring a controls system. *Intermountain Environmental, Inc.* [online]. b.r. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://inmtn.com/agriculture/irrigation/flumes-weirs/flumes/>
- [11] Pars aqua s.r.o.: Měrné Parshallovy žlaby. [Http://www.pars-aqua.cz](http://www.pars-aqua.cz) [online]. 2004 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.pars-aqua.cz/parshal.html>

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|----------|--|----|
| Obr. 1) | Pohled na Měrný žlab PARS v šachtě [1] | 13 |
| Obr. 2) | Ostrohranný přeliv trojúhelníkového výřezu | 18 |
| Obr. 3) | Ostrohranný přeliv s kombinovaným výřezem..... | 18 |
| Obr. 4) | Protiproudň pohled na Venturiho žlab s šířkou hrdla 150 mm [8] | 20 |
| Obr. 5) | Schéma žlabu typu SANIIRI [9] | 21 |
| Obr. 6) | Schéma Parshallova žlabu [9] | 24 |
| Obr. 7) | Schéma žlabu PARS [7] | 25 |
| Obr. 8) | Žlab PARS P3 při instalaci modelu..... | 26 |
| Obr. 9) | Žlab PARS P3 instalace v praxi | 26 |
| Obr. 10) | Vyhodnocovací jednotka..... | 29 |
| Obr. 11) | Ultrazvukový snímač hladiny | 29 |
| Obr. 12) | sklopný žlab 40 | 31 |
| Obr. 13) | Sklopný žlab 40 | 31 |
| Obr. 14) | Thomsonův přeliv s vyrovnávací nádrží | 32 |
| Obr. 15) | Nerezová děrovaná síta | 32 |
| Obr. 16) | Polystyrénová tlumící deska..... | 33 |
| Obr. 17) | Vizualizace laboratorní trasy, ovládací systém laboratoře..... | 33 |
| Obr. 18) | Upevnění měrného žlabu PARS P3 spolu s hrotovým digitálním měřítkem a zavazovacími křídly..... | 34 |
| Obr. 19) | Řídící počítač laboratoře, velín laboratoře..... | 35 |
| Obr. 20) | Upevnění žlabu PARS P3 do sklopného žlabu 40..... | 35 |
| Obr. 21) | Hrotové měřítko | 35 |
| Obr. 22) | Hrotové měřítko | 35 |
| Obr. 23) | Indukční průtokoměr DN 150 | 36 |
| Obr. 24) | vyhodnocovací jednotka série 99 | 36 |
| Obr. 25) | Napojení přítokového potrubí na MŽ PARS P3 | 38 |
| Obr. 26) | Nátok na přítokové potrubí..... | 38 |
| Obr. 27) | Stupnice náklonu sklopného žlabu 40 | 38 |
| Obr. 28) | Celá soustava PARS P3, přítokové potrubí s nátokem..... | 38 |
| Obr. 29) | Podložení odtokové strany MŽ pro dosažení požadovaného sklonu dna MŽ | 39 |
| Obr. 30) | Přechod z říčního do bystřinného proudění..... | 48 |
| Obr. 31) | Bystřinné proudění $Q=3,5\text{ l/s}$, sklon potrubí 4,37 % | 48 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|--------|--|----|
| Tab 1) | Rozměry standartních žlabů typu Parshall [9]..... | 23 |
| Tab 2) | Technické parametry žlabů PARS P1-P9 [11]..... | 25 |
| Tab 3) | Vzniklé kombinace z modifikací modelu | 37 |
| Tab 4) | Hodnoty získané z funkční závislosti Q/H po proložení..... | 41 |
| Tab 5) | Maximální kladné a záporné ΔQ a ΔH | 50 |

SEZNAM GRAFŮ

| | | |
|---------|---|----|
| Graf 1 | Q/H charakteristika žlabu PARS P3 udávaná výrobcem | 26 |
| Graf 2 | Q/H charakteristika měrného žlabu PARS P3 za optimálních podmínek | 39 |
| Graf 3 | Q/H charakteristiky jednotlivých kombinací | 40 |
| Graf 4 | ΔQ , pro všechny kombinace..... | 42 |
| Graf 5 | ΔQ , pro všechny kombinace..... | 42 |
| Graf 6 | ΔQ , MŽ PARS P3 za optimálních podmínek, pod různými sklony | 43 |
| Graf 7 | ΔH , MŽ PARS P3 za optimálních podmínek, pod různými sklony | 43 |
| Graf 8 | ΔH , PARS a přírodní potrubí ve stejném sklonu | 44 |
| Graf 9 | ΔQ , PARS bez přírodní potrubí ve sklonu..... | 44 |
| Graf 10 | ΔQ , PARS vodorovně, přírodní potrubí pod sklony..... | 45 |
| Graf 11 | ΔH , PARS vodorovný, potrubí pod sklony | 45 |
| Graf 12 | Procentuální odchylky spolu s Q/H charakteristikami porovnávané při stejném, nebo blízkém sklonu proudění na MŽ PARS P3 při různých modifikacích modelu | 46 |
| Graf 13 | Závislost Freudova kritéria na Q ve vzdálenosti 4D..... | 47 |
| Graf 14 | Závislost Q na H ve vzdálenosti 4D | 47 |
| Graf 15 | Závislost Freudova kritéria na ΔQ ve vzdálenosti 4D | 48 |

SEZNAM PŘÍLOH

P1 - Q/H charakteristiky MŽ PARS P3, MŽ PARS P3 se zavazovacími křídly:

- /1. Příklad tabulárního zpracování měření
- /2. Sklon PARSu P3 $i = 0,0 \%$
- /3. Sklon PARSu P3 $i = 0,5\%$
- /4. Sklon PARSu P3 $i = 1,0\%$
- /5. Sklon PARSu P3 $i = 1,5\%$

P2 - Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím a ve stejných sklonech:

- /1. Sklon PARSu P3 $i = 0,0 \%$, sklon přívodního potrubí $i = 0,0 \%$
- /2. Sklon PARSu P3 $i = 0,5 \%$, sklon přívodního potrubí $i = 0,5 \%$
- /3. Sklon PARSu P3 $i = 1,0 \%$, sklon přívodního potrubí $i = 1,0 \%$
- /4. Sklon PARSu P3 $i = 1,5 \%$, sklon přívodního potrubí $i = 1,5 \%$

P3 - Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím. PARS ve vodorovné poloze (podložen), přívodní potrubí ve sklonech:

- /1. PARS ve vodorovné poloze – podložen 5 mm, potrubí ve sklonu $i = 0,55\%$
- /2. PARS ve vodorovné poloze – podložen 10 mm, potrubí ve sklonu $i = 1,09\%$
- /3. PARS ve vodorovné poloze – podložen 15 mm, potrubí ve sklonu $i = 1,64\%$
- /4. PARS ve vodorovné poloze – podložen 20 mm, potrubí ve sklonu $i = 2,19\%$
- /5. PARS ve vodorovné poloze – podložen 30 mm, potrubí ve sklonu $i = 3,28\%$
- /6. PARS ve vodorovné poloze – podložen 40 mm, potrubí ve sklonu $i = 4,37\%$

P4 - Výčet proložených Q, H a přehledná tabulka všech odchylek

- /1. ΔH
- /2. ΔQ

P5 - Q/H charakteristiky kombinací

P6 - ΔQ , všechny kombinace

P7 - ΔH , všechny kombinace

P8 ΔH , ΔQ spolu s Q/H charakteristikami porovnávané při stejném, nebo blízkém sklonu proudění na MŽ PARS P3 při různých modifikacích modelu:

- /1. Sklon proudění $0,0 \%$
- /2. Sklon proudění $1,0 \%$ (+ $1,09 \%$)

P9 Freudovo kritérium

- /1. Ukázka zpracování
- /2. Vybraný graf závislosti Fr na ΔQ vzdálenost v potrubí 4D

P1

/1.

Q/H charakteristiky MŽ PARS P3, MŽ PARS P3 se zavazovacími křídly:

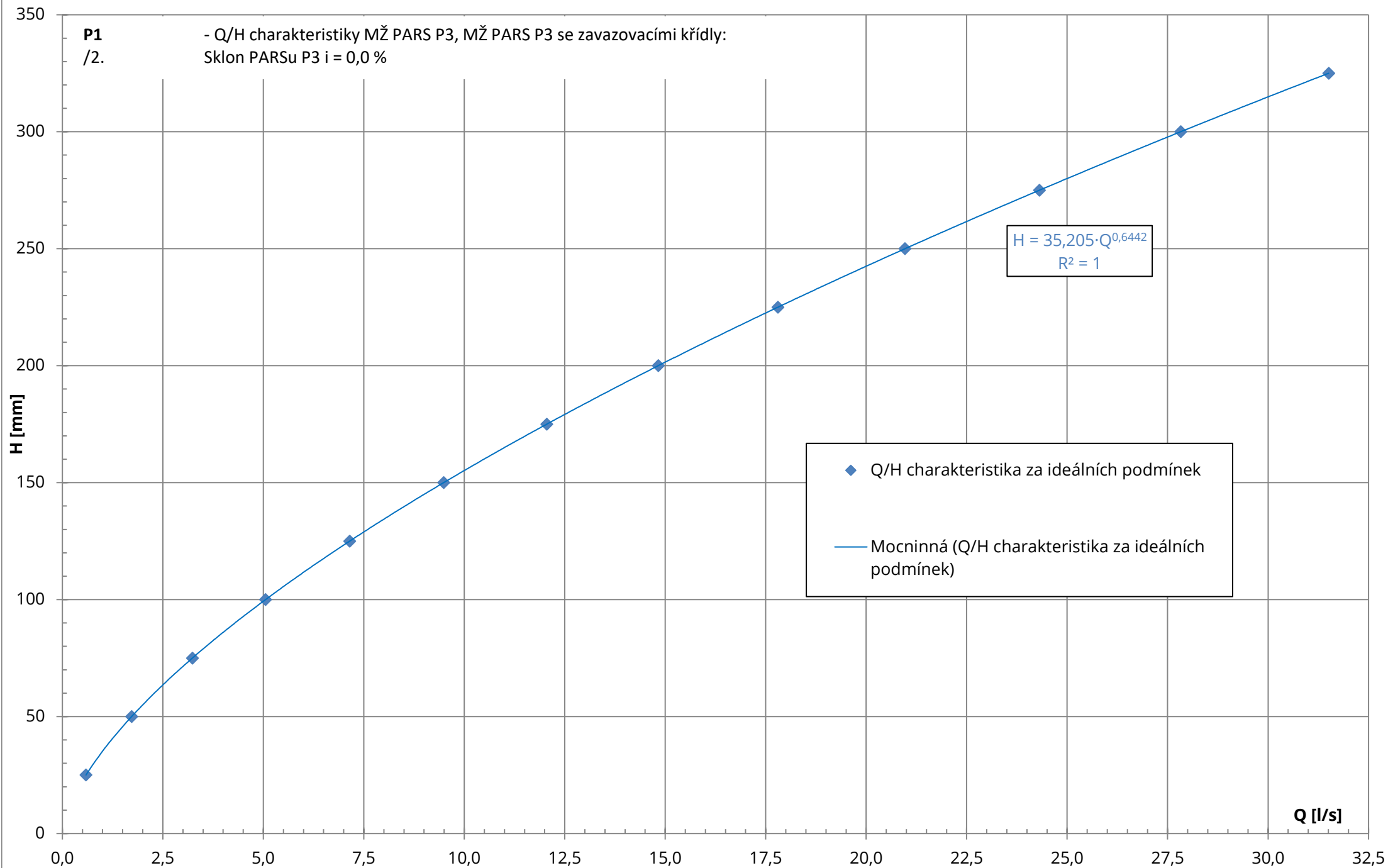
Příklad tabulárního zpracování měření

| info: 09.12.2016 10:45 - 13:20 | | Sklon PARSu: 0,50% | | | | | | | | | | Sklon POTRUBÍ: 0,50% | | |
|--------------------------------|----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|----------------|---------------------|
| Q _{pož} | H ₁ | Q měřené-skutečné | | | | | | | | | | Q _{průměr} | H ₂ | H _{průměr} |
| [l/s] | [mm] | [l/s] | | | | | | | | | | [l/s] | [mm] | [mm] |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| 3,5 | 75,93 | 3,52 | 3,52 | 3,53 | 3,54 | 3,53 | 3,52 | 3,53 | 3,54 | 3,53 | 3,53 | 3,529 | 76,24 | 76,09 |
| 12 | 167,80 | 11,75 | 11,79 | 11,78 | 11,77 | 11,73 | 11,72 | 11,71 | 11,70 | 11,72 | 11,73 | 11,74 | 167,86 | 167,83 |
| 22 | 249,37 | 21,33 | 21,23 | 21,25 | 21,25 | 21,24 | 21,28 | 21,29 | 21,30 | 21,31 | 21,29 | 21,277 | 248,91 | 249,14 |
| 30 | 310,75 | 30,11 | 29,98 | 30,24 | 30,16 | 30,10 | 30,12 | 30,14 | 30,26 | 30,34 | 30,38 | 30,183 | 310,95 | 310,85 |
| 27 | 288,88 | 26,81 | 26,80 | 26,75 | 26,78 | 26,83 | 26,85 | 26,82 | 26,83 | 26,89 | 26,99 | 26,835 | 288,25 | 288,57 |
| 17 | 208,81 | 16,28 | 16,27 | 16,28 | 16,27 | 16,21 | 16,20 | 16,22 | 16,26 | 16,29 | 16,30 | 16,258 | 208,54 | 208,68 |
| 7 | 113,20 | 6,52 | 6,52 | 6,51 | 6,50 | 6,51 | 6,49 | 6,47 | 6,47 | 6,48 | 6,47 | 6,494 | 113,27 | 113,24 |
| 5 | 89,68 | 4,55 | 4,55 | 4,53 | 4,54 | 4,55 | 4,54 | 4,55 | 4,54 | 4,55 | 4,50 | 4,54 | 89,69 | 89,69 |

| info: 11.01.2017 9:30-11:30 | | Sklon PARSu: 0,00% | | | | | | | | | | Sklon POTRUBÍ: 1,09% | | |
|-----------------------------|----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|----------------|---------------------|
| Q _{pož} | H ₁ | Q měřené-skutečné | | | | | | | | | | Q _{průměr} | H ₂ | H _{průměr} |
| [l/s] | [mm] | [l/s] | | | | | | | | | | [l/s] | [mm] | [mm] |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| 3,5 | 75,04 | 3,23 | 3,23 | 3,22 | 3,22 | 3,21 | 3,21 | 3,22 | 3,23 | 3,23 | 3,23 | 3,223 | 74,57 | 74,81 |
| 12 | 170,36 | 11,69 | 11,71 | 11,70 | 11,66 | 11,68 | 11,69 | 11,70 | 11,69 | 11,68 | 11,65 | 11,685 | 170,39 | 170,38 |
| 22 | 252,21 | 21,49 | 21,49 | 21,50 | 21,45 | 21,46 | 21,46 | 21,47 | 21,46 | 21,45 | 21,46 | 21,469 | 251,92 | 252,07 |
| 30 | 311,35 | 30,00 | 29,98 | 30,06 | 30,26 | 30,25 | 30,21 | 30,07 | 29,99 | 29,84 | 29,90 | 30,056 | 311,20 | 311,28 |
| 27 | 290,55 | 26,61 | 26,70 | 26,64 | 26,62 | 26,60 | 26,61 | 26,59 | 26,58 | 26,62 | 26,66 | 26,623 | 289,25 | 289,90 |
| 17 | 213,66 | 16,67 | 16,64 | 16,59 | 16,58 | 16,50 | 16,52 | 16,54 | 16,57 | 16,54 | 16,60 | 16,575 | 214,07 | 213,87 |
| 7 | 118,24 | 6,69 | 6,70 | 6,70 | 6,69 | 6,66 | 6,66 | 6,67 | 6,66 | 6,65 | 6,64 | 6,672 | 118,03 | 118,14 |
| 5 | 94,92 | 4,76 | 4,76 | 4,76 | 4,76 | 4,75 | 4,74 | 4,73 | 4,72 | 4,71 | 4,70 | 4,739 | 95,13 | 95,03 |

P1
/2.

- Q/H charakteristiky MŽ PARS P3, MŽ PARS P3 se zavazovacími křídly:
Sklon PARSu P3 i = 0,0 %



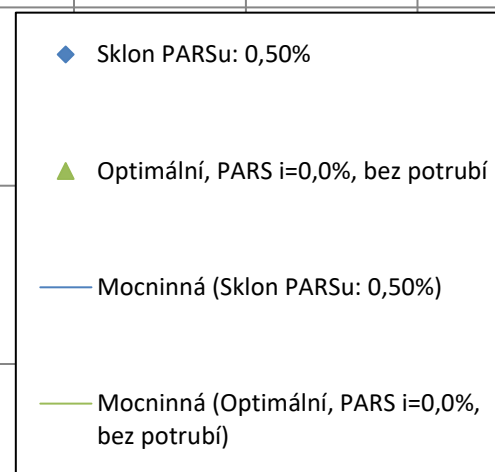
P1
/3.

- Q/H charakteristiky MŽ PARS P3, MŽ PARS P3 se zavazovacími křídly:
Sklon PARSu P3 i = 0,5%

$$H = 34,194 \cdot Q^{0,6499}$$
$$R^2 = 0,9999$$

$$H = 35,205 \cdot Q^{0,6442}$$
$$R^2 = 1$$

H [mm]



Q [l/s]

P1
/4.

- Q/H charakteristiky MŽ PARS P3, MŽ PARS P3 se zavazovacími křídly:
Sklon PARSu P3 i = 1,0%

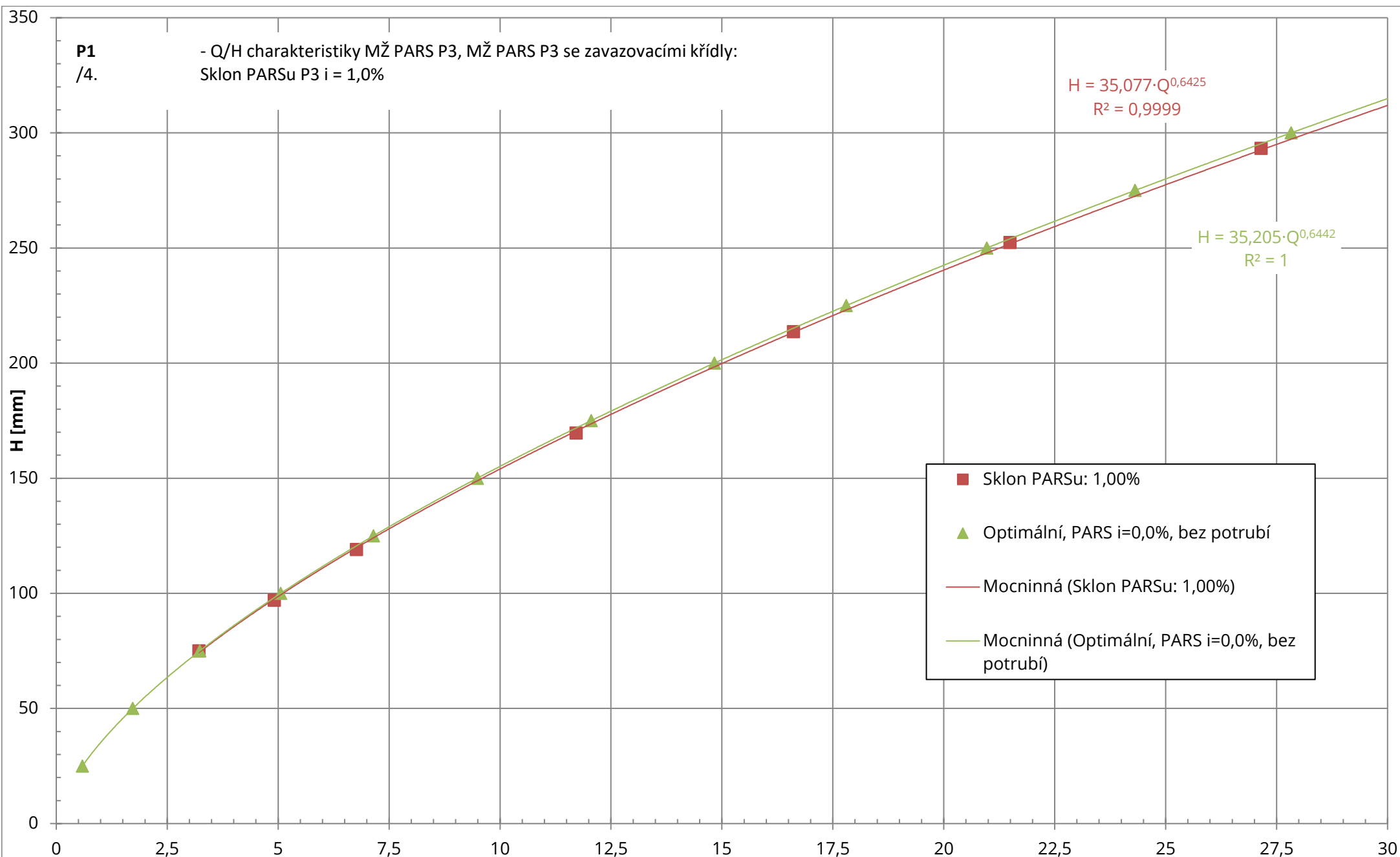
$$H = 35,077 \cdot Q^{0,6425}$$
$$R^2 = 0,9999$$

$$H = 35,205 \cdot Q^{0,6442}$$
$$R^2 = 1$$

H [mm]

- Sklon PARSu: 1,00%
- ▲ Optimální, PARS i=0,0%, bez potrubí
- Mocninná (Sklon PARSu: 1,00%)
- Mocninná (Optimální, PARS i=0,0%, bez potrubí)

Q [mm]



P1
/5.

- Q/H charakteristiky MŽ PARS P3, MŽ PARS P3 se zavazovacími křídly:
Sklon PARSu P3 i = 1,5%

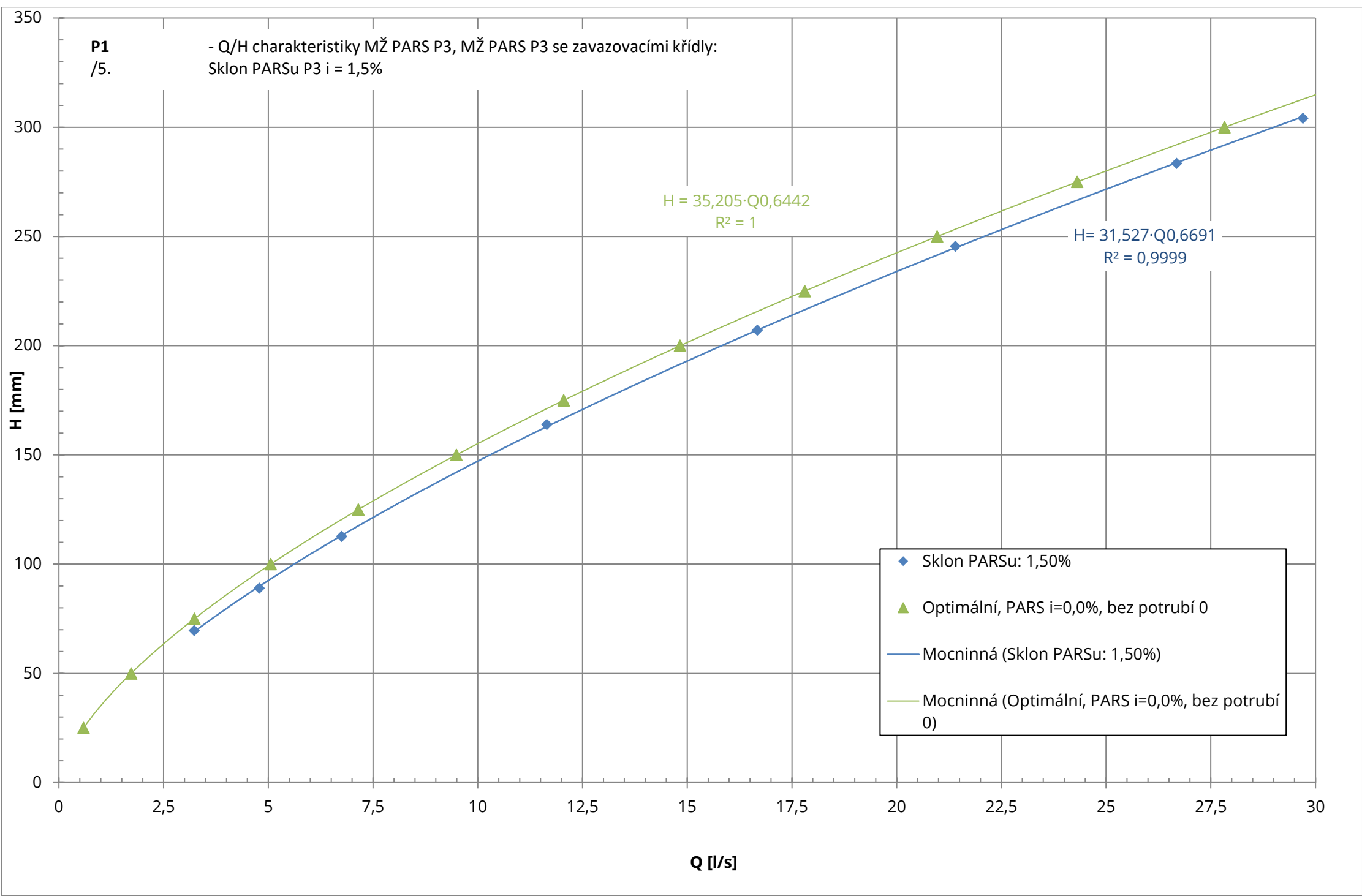
$$H = 35,205 \cdot Q^{0,6442}$$
$$R^2 = 1$$

$$H = 31,527 \cdot Q^{0,6691}$$
$$R^2 = 0,9999$$

H [mm]

- ◆ Sklon PARSu: 1,50%
- ▲ Optimální, PARS i=0,0%, bez potrubí 0
- Mocninná (Sklon PARSu: 1,50%)
- Mocninná (Optimální, PARS i=0,0%, bez potrubí 0)

Q [l/s]

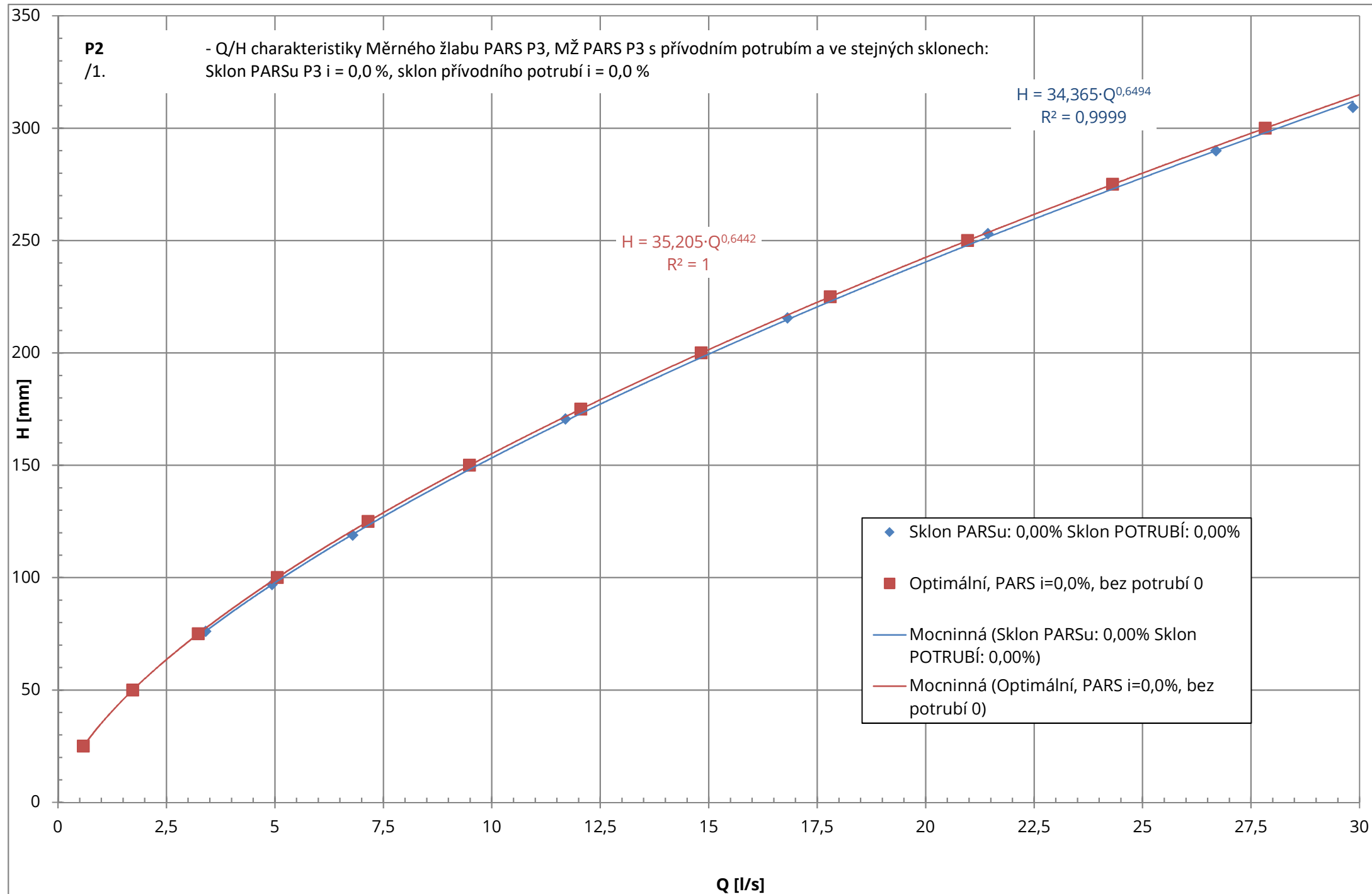


P2
/1.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím a ve stejných sklonech:
Sklon PARSu P3 i = 0,0 %, sklon přívodního potrubí i = 0,0 %

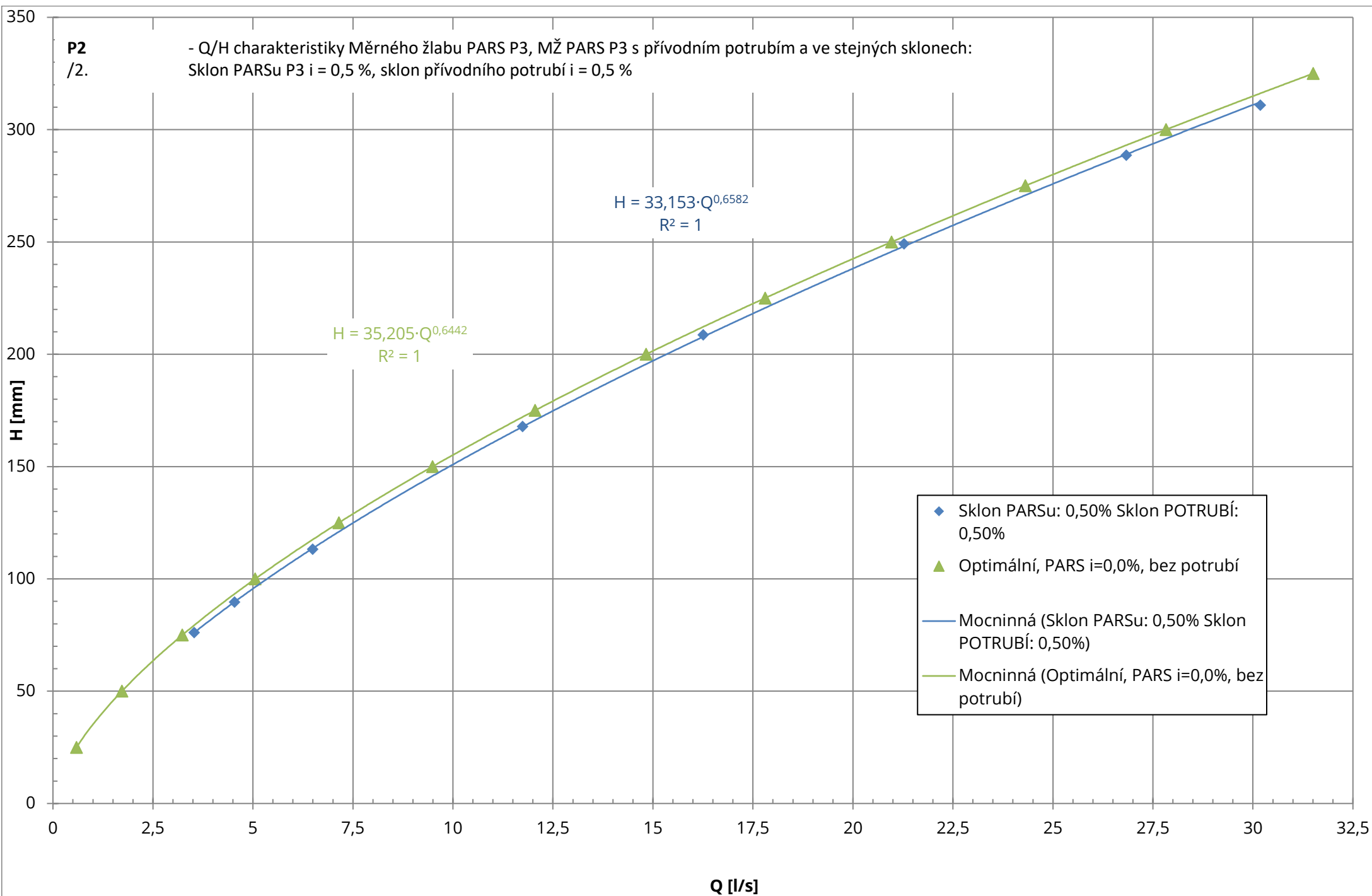
$$H = 34,365 \cdot Q^{0,6494}$$
$$R^2 = 0,9999$$

$$H = 35,205 \cdot Q^{0,6442}$$
$$R^2 = 1$$

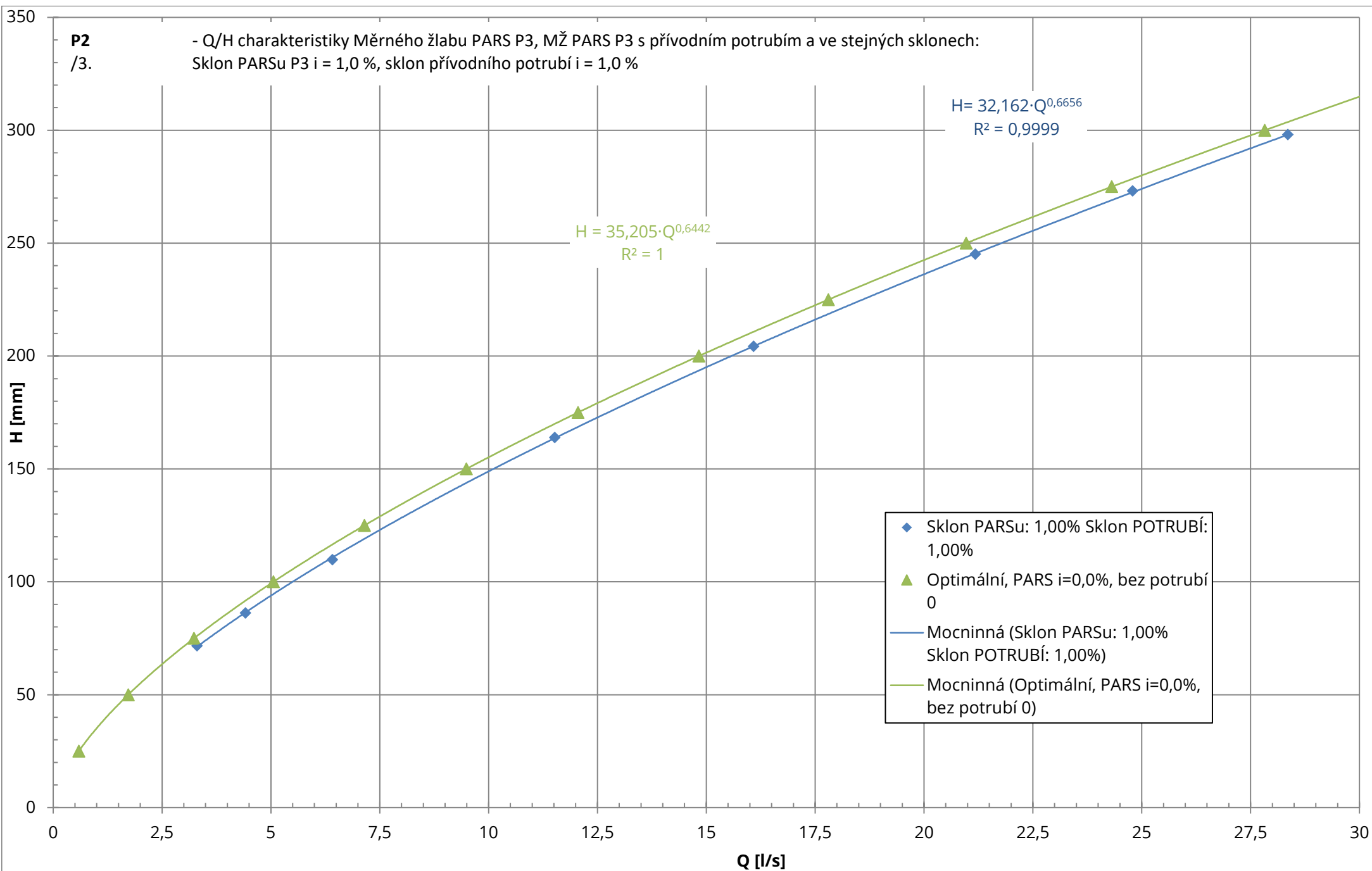


P2
/2.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím a ve stejných sklonech:
Sklon PARSu P3 i = 0,5 %, sklon přívodního potrubí i = 0,5 %

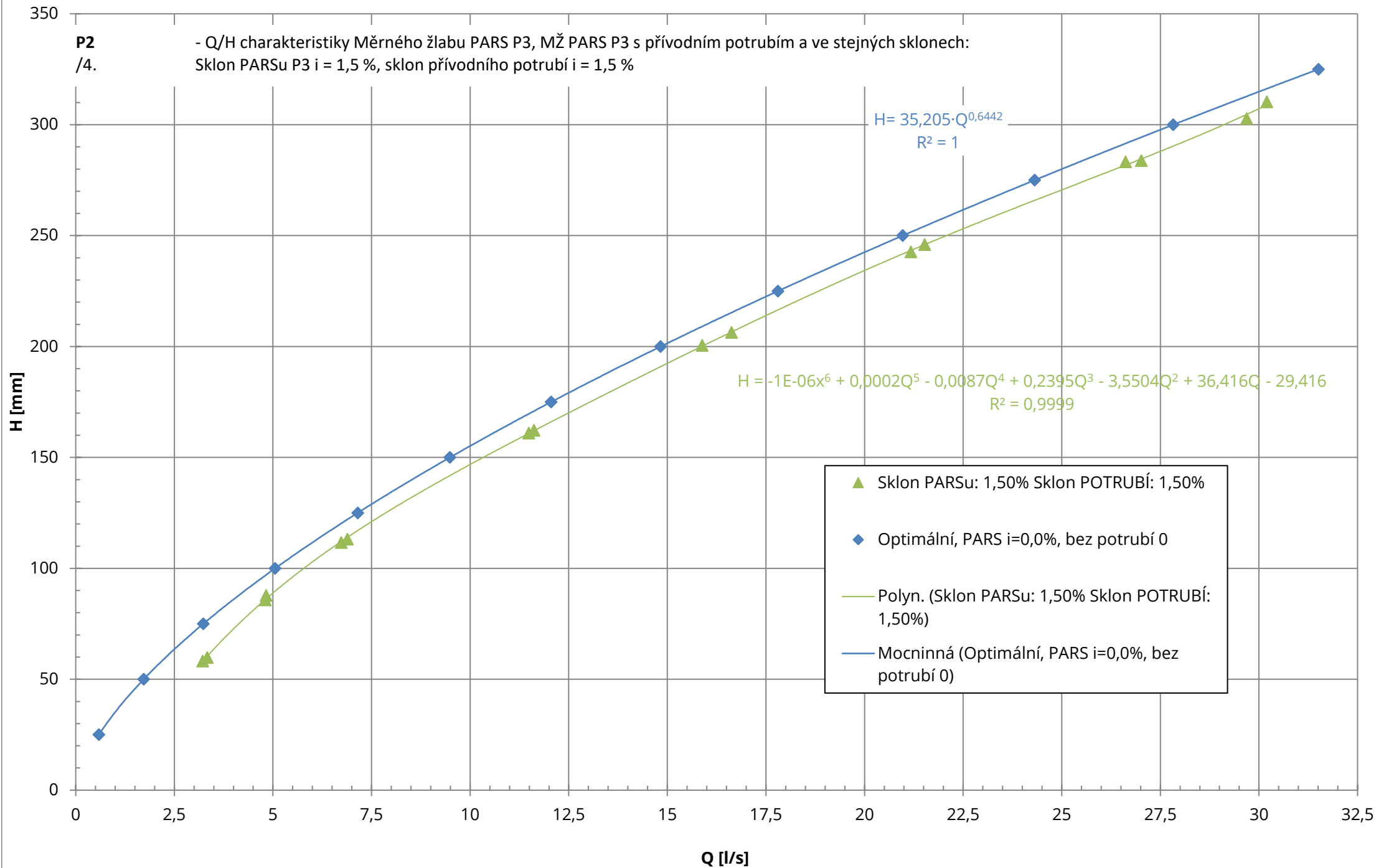


P2
/3.
- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím a ve stejných sklonech:
Sklon PARSu P3 i = 1,0 %, sklon přívodního potrubí i = 1,0 %



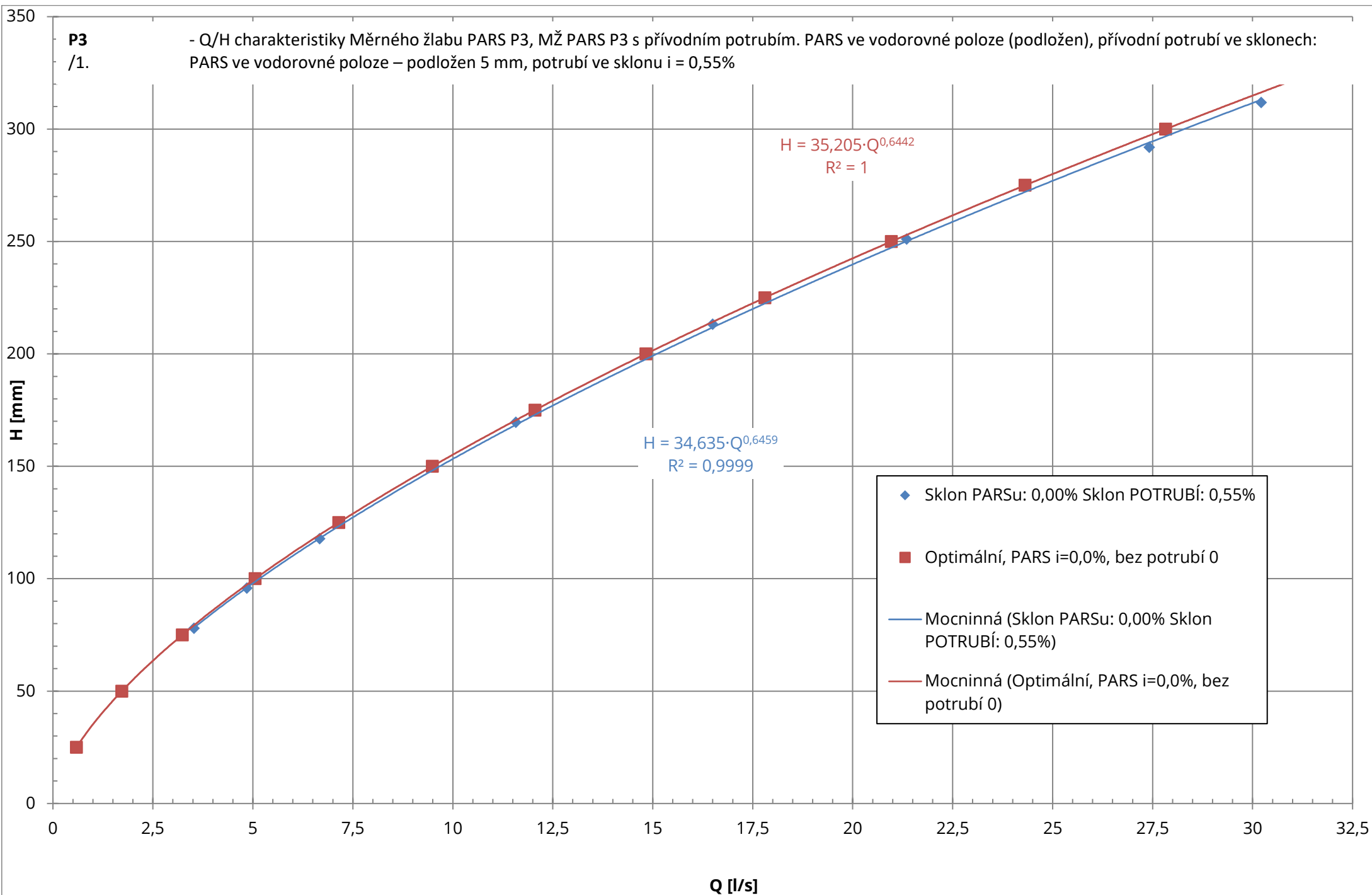
P2
/4.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím a ve stejných sklonech:
Sklon PARSu P3 i = 1,5 %, sklon přívodního potrubí i = 1,5 %



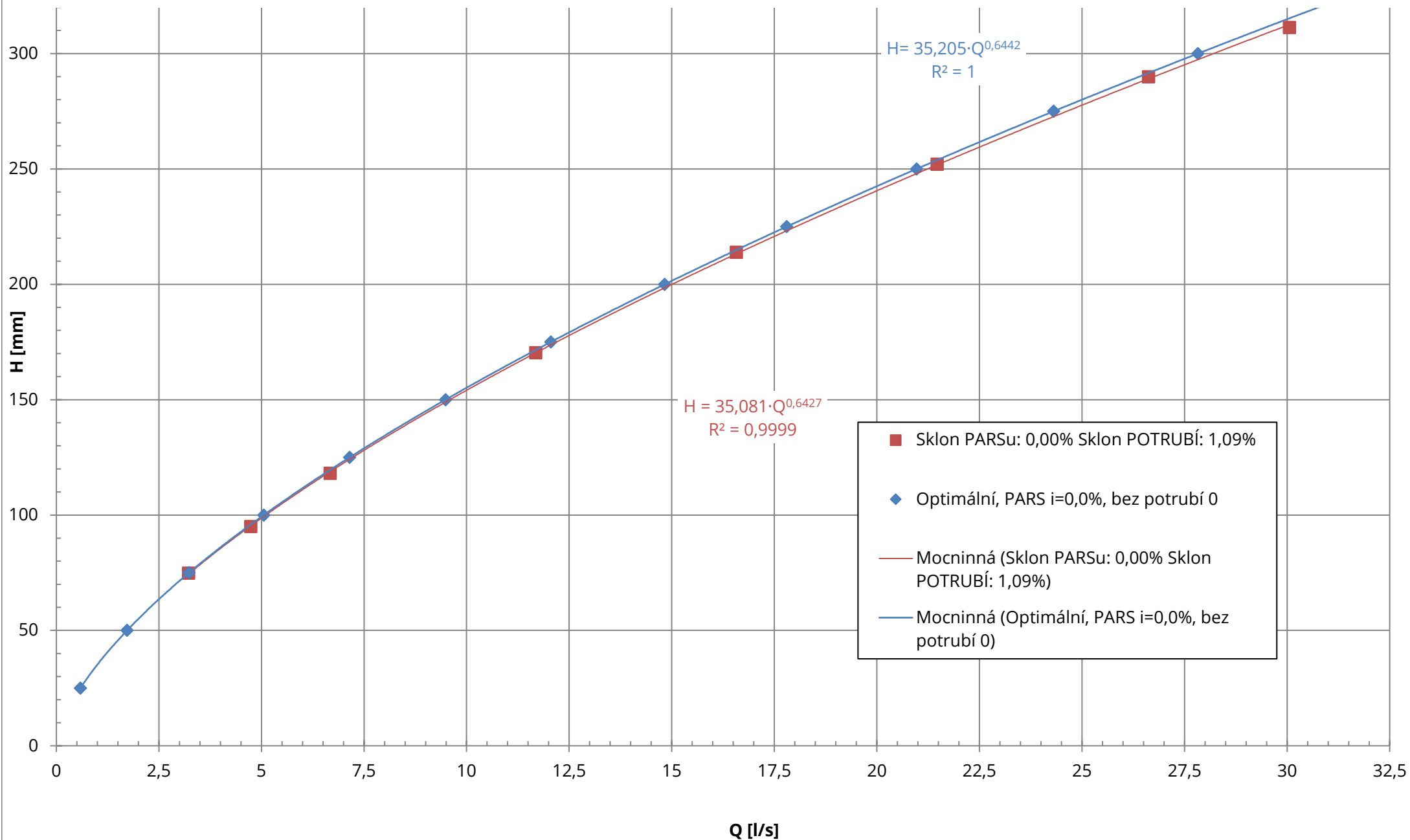
P3
/1.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím. PARS ve vodorovné poloze (podložen), přívodní potrubí ve sklonech:
PARS ve vodorovné poloze – podložen 5 mm, potrubí ve sklonu $i = 0,55\%$



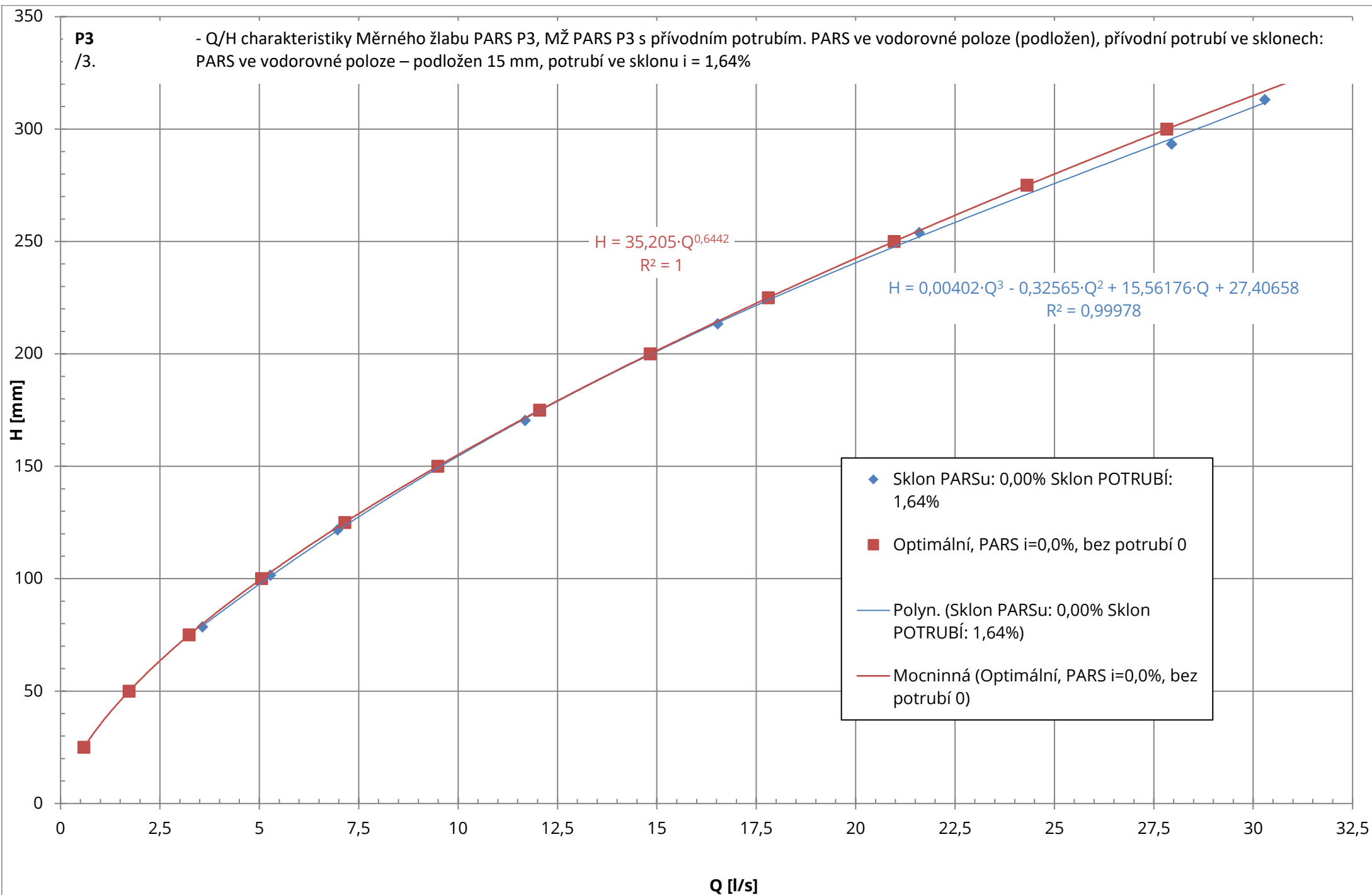
P3
/2.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím. PARS ve vodorovné poloze (podložen), přívodní potrubí ve sklonech:
PARS ve vodorovné poloze – podložen 10 mm, potrubí ve sklonu $i = 1,09\%$



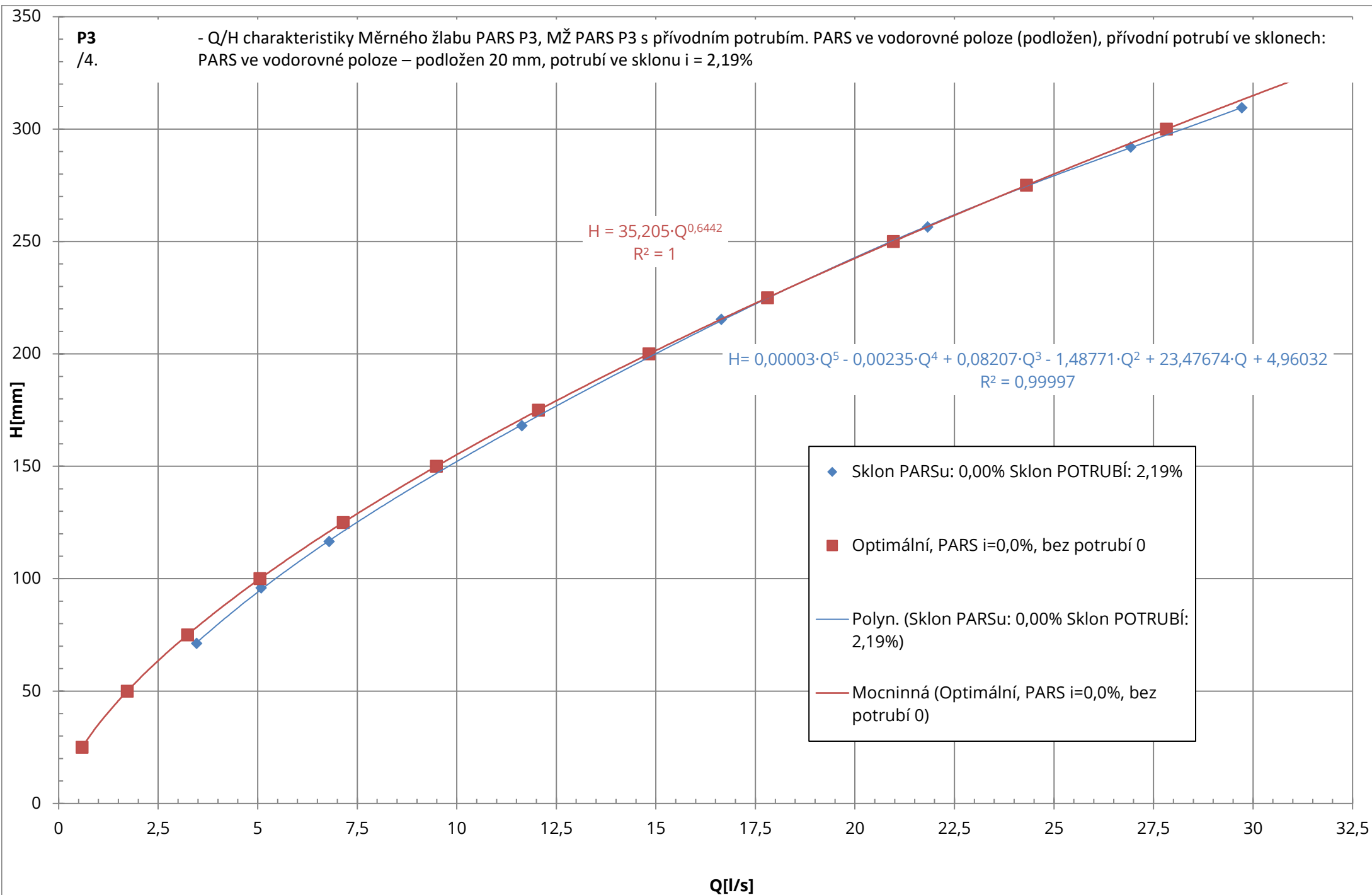
P3
/3.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím. PARS ve vodorovné poloze (podložen), přívodní potrubí ve sklonech:
PARS ve vodorovné poloze – podložen 15 mm, potrubí ve sklonu $i = 1,64\%$



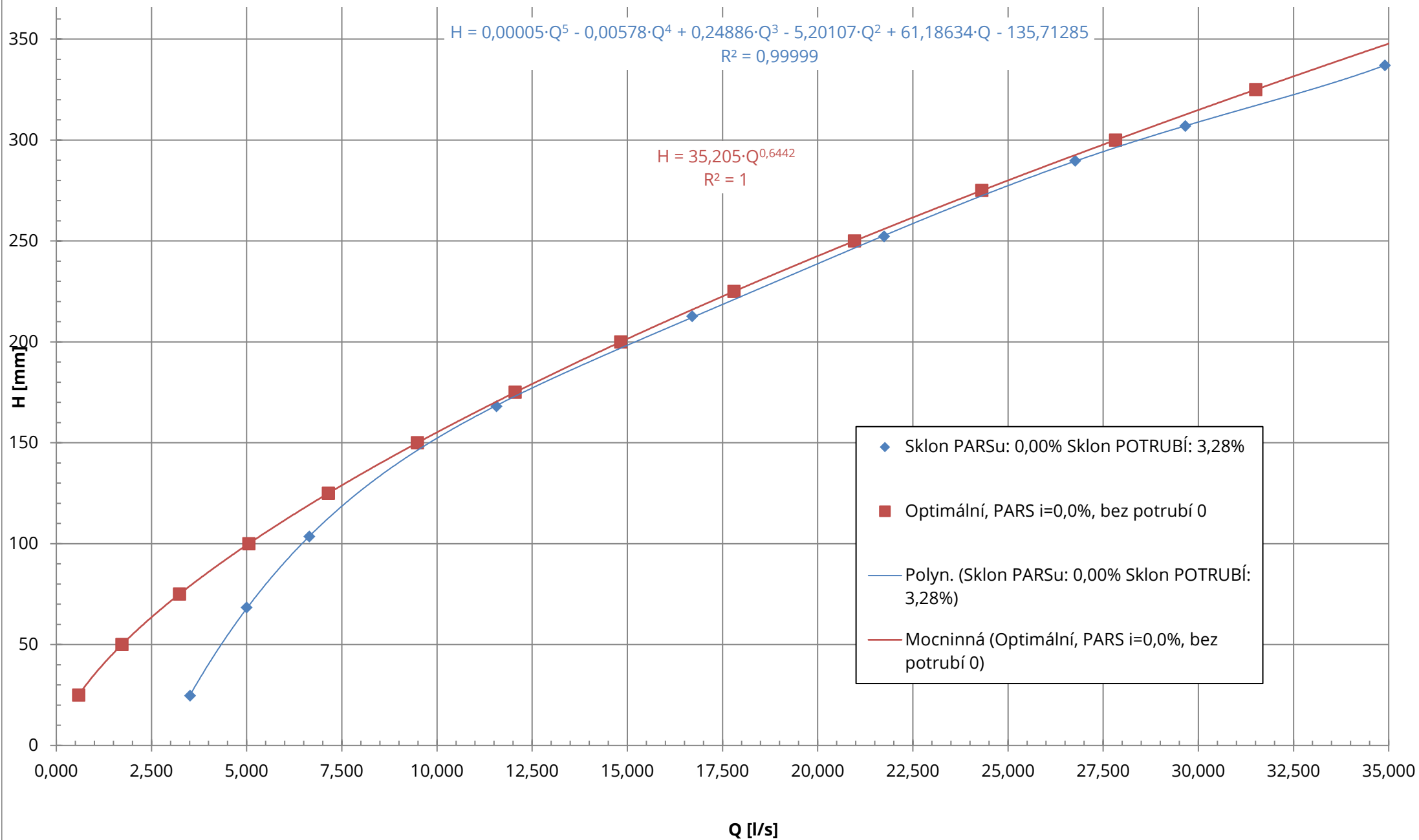
P3
/4.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím. PARS ve vodorovné poloze (podložen), přívodní potrubí ve sklonech:
PARS ve vodorovné poloze – podložen 20 mm, potrubí ve sklonu $i = 2,19\%$



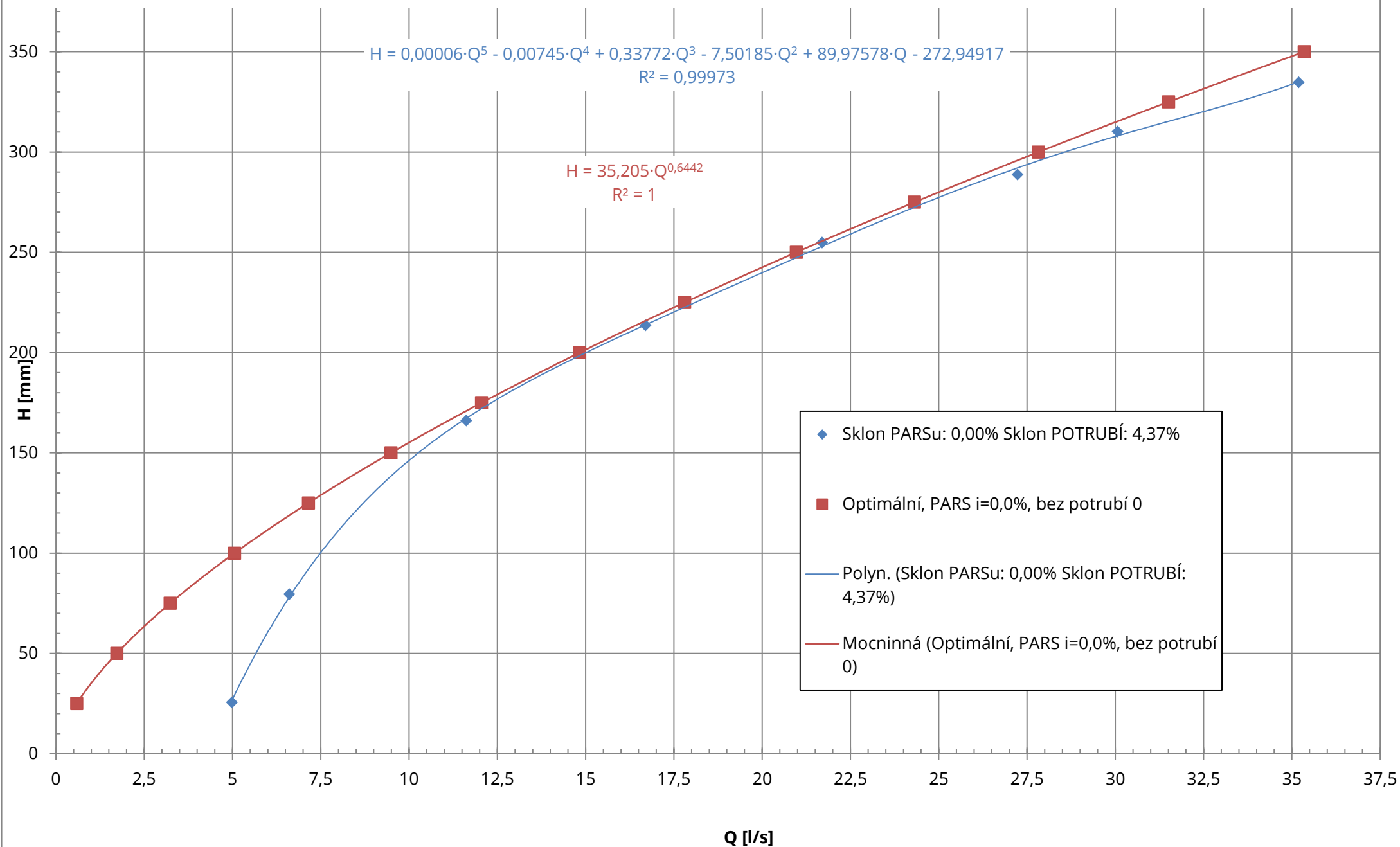
P3
/5.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím. PARS ve vodorovné poloze (podložen), přívodní potrubí ve sklonech:
PARS ve vodorovné poloze – podložen 30 mm, potrubí ve sklonu $i = 3,28\%$



P3
/6.

- Q/H charakteristiky Měrného žlabu PARS P3, MŽ PARS P3 s přívodním potrubím. PARS ve vodorovné poloze (podložen), přívodní potrubí ve sklonech:
PARS ve vodorovné poloze – podložen 40 mm, potrubí ve sklonu $i = 4,37\%$



P4
/1.

- Výčet proložených Q, H a přehledná tabulka všech odchylek
ΔH

| | MODIFIKACE | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|---------|---------|---------|---------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | PARS P3 | PARS P3 | PARS P3 | PARS P3 | PARS P3 | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | § PŘÍVODNÍM POTRUBÍM |
| SKLON POTRUBÍ [%] | - | - | - | - | - | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0,55 | 1,09 | 1,64 | 2,19 | 3,28 | 4,37 |
| SKLON PARS P3 [%] | 0 | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Q[l/s] | H[mm] | | | | | | | | | | | | | | |
| 3,00 | 71,444 | 71,44 | 69,83 | 67,56 | 65,75 | 70,14 | 68,32 | 66,82 | 53,68 | 70,42 | 71,08 | 70,73 | 64,03 | | |
| 5,00 | 99,284 | 99,28 | 97,32 | 94,65 | 92,55 | 97,73 | 95,63 | 93,88 | 88,88 | 97,94 | 98,70 | 97,82 | 94,02 | 67,85 | 27,14 |
| 7,50 | 128,920 | 128,92 | 126,66 | 123,69 | 121,39 | 127,17 | 124,88 | 122,97 | 121,05 | 127,27 | 128,08 | 127,95 | 125,16 | 118,55 | 100,32 |
| 10,00 | 155,169 | 155,17 | 152,70 | 149,56 | 147,16 | 153,29 | 150,91 | 148,92 | 146,83 | 153,26 | 154,09 | 154,17 | 152,13 | 152,27 | 146,25 |
| 12,50 | 179,157 | 179,16 | 176,54 | 173,30 | 170,85 | 177,19 | 174,79 | 172,76 | 170,11 | 177,01 | 177,85 | 177,81 | 176,81 | 177,15 | 176,83 |
| 15,00 | 201,485 | 201,48 | 198,74 | 195,46 | 193,02 | 199,47 | 197,07 | 195,05 | 192,44 | 199,14 | 199,96 | 200,15 | 200,09 | 198,32 | 199,94 |
| 17,50 | 222,520 | 222,52 | 219,68 | 216,40 | 213,99 | 220,47 | 218,12 | 216,13 | 213,97 | 219,99 | 220,79 | 221,69 | 222,17 | 218,53 | 220,23 |
| 20,00 | 242,509 | 242,51 | 239,60 | 236,34 | 233,99 | 240,44 | 238,16 | 236,22 | 234,29 | 239,80 | 240,57 | 242,01 | 242,87 | 238,71 | 239,83 |
| 22,50 | 261,626 | 261,63 | 258,66 | 255,44 | 253,18 | 259,55 | 257,35 | 255,48 | 253,10 | 258,76 | 259,49 | 260,19 | 261,91 | 258,61 | 259,09 |
| 25,00 | 280,000 | 280,00 | 276,99 | 273,84 | 271,67 | 277,93 | 275,83 | 274,04 | 270,64 | 276,98 | 277,67 | 275,79 | 279,24 | 277,40 | 277,37 |
| 27,50 | 297,730 | 297,73 | 294,69 | 291,62 | 289,56 | 295,68 | 293,69 | 291,99 | 288,00 | 294,56 | 295,21 | 290,45 | 295,33 | 294,24 | 293,74 |
| 30,00 | 314,895 | 314,90 | 311,84 | 308,86 | 306,92 | 312,87 | 311,00 | 309,40 | 307,23 | 311,59 | 312,19 | 309,96 | 311,48 | 308,93 | 307,75 |
| 32,50 | 331,558 | 331,56 | 328,49 | 325,62 | 323,81 | 329,56 | 327,83 | 326,33 | 331,29 | 328,13 | 328,67 | 346,99 | 330,11 | 322,47 | 320,17 |
| 35,00 | 347,771 | 347,77 | 344,70 | 341,95 | 340,27 | 345,81 | 344,21 | 342,83 | 363,76 | 344,21 | 344,70 | 424,35 | 355,07 | 337,71 | 333,72 |
| Q[l/s] | H[mm] | ΔH [%] | | | | | | | | | | | | | |
| 3,00 | 71,444 | 0,00 | -2,26 | -5,44 | -7,96 | -1,83 | -4,37 | -6,47 | -24,87 | -1,44 | -0,52 | -1,00 | -10,37 | | |
| 5,00 | 99,284 | 0,00 | -1,98 | -4,67 | -6,79 | -1,57 | -3,68 | -5,44 | -10,48 | -1,35 | -0,59 | -1,47 | -5,30 | -31,66 | -72,66 |
| 7,50 | 128,920 | 0,00 | -1,75 | -4,05 | -5,84 | -1,36 | -3,13 | -4,62 | -6,10 | -1,28 | -0,65 | -0,75 | -2,92 | -8,04 | -22,19 |
| 10,00 | 155,169 | 0,00 | -1,59 | -3,61 | -5,16 | -1,21 | -2,74 | -4,03 | -5,38 | -1,23 | -0,70 | -0,64 | -1,96 | -1,87 | -5,75 |
| 12,50 | 179,157 | 0,00 | -1,46 | -3,27 | -4,63 | -1,10 | -2,44 | -3,57 | -5,05 | -1,20 | -0,73 | -0,75 | -1,31 | -1,12 | -1,30 |
| 15,00 | 201,485 | 0,00 | -1,36 | -2,99 | -4,20 | -1,00 | -2,19 | -3,19 | -4,49 | -1,17 | -0,76 | -0,66 | -0,69 | -1,57 | -0,77 |
| 17,50 | 222,520 | 0,00 | -1,27 | -2,75 | -3,83 | -0,92 | -1,98 | -2,87 | -3,84 | -1,14 | -0,78 | -0,37 | -0,16 | -1,80 | -1,03 |
| 20,00 | 242,509 | 0,00 | -1,20 | -2,55 | -3,51 | -0,85 | -1,80 | -2,60 | -3,39 | -1,12 | -0,80 | -0,21 | 0,15 | -1,57 | -1,11 |
| 22,50 | 261,626 | 0,00 | -1,13 | -2,36 | -3,23 | -0,79 | -1,63 | -2,35 | -3,26 | -1,10 | -0,82 | -0,55 | 0,11 | -1,15 | -0,97 |
| 25,00 | 280,000 | 0,00 | -1,07 | -2,20 | -2,97 | -0,74 | -1,49 | -2,13 | -3,34 | -1,08 | -0,83 | -1,50 | -0,27 | -0,93 | -0,94 |
| 27,50 | 297,730 | 0,00 | -1,02 | -2,05 | -2,74 | -0,69 | -1,36 | -1,93 | -3,27 | -1,06 | -0,85 | -2,44 | -0,81 | -1,17 | -1,34 |
| 30,00 | 314,895 | 0,00 | -0,97 | -1,92 | -2,53 | -0,64 | -1,24 | -1,75 | -2,43 | -1,05 | -0,86 | -1,57 | -1,08 | -1,89 | -2,27 |
| 32,50 | 331,558 | 0,00 | -0,93 | -1,79 | -2,34 | -0,60 | -1,13 | -1,58 | -0,08 | -1,04 | -0,87 | 4,65 | -0,44 | -2,74 | -3,43 |
| 35,00 | 347,771 | 0,00 | -0,88 | -1,67 | -2,16 | -0,56 | -1,02 | -1,42 | 4,60 | -1,02 | -0,88 | 22,02 | 2,10 | -2,89 | -4,04 |

P4

/2.

- Výčet proložených Q, H a přehledná tabulka všech odchylek
 ΔQ

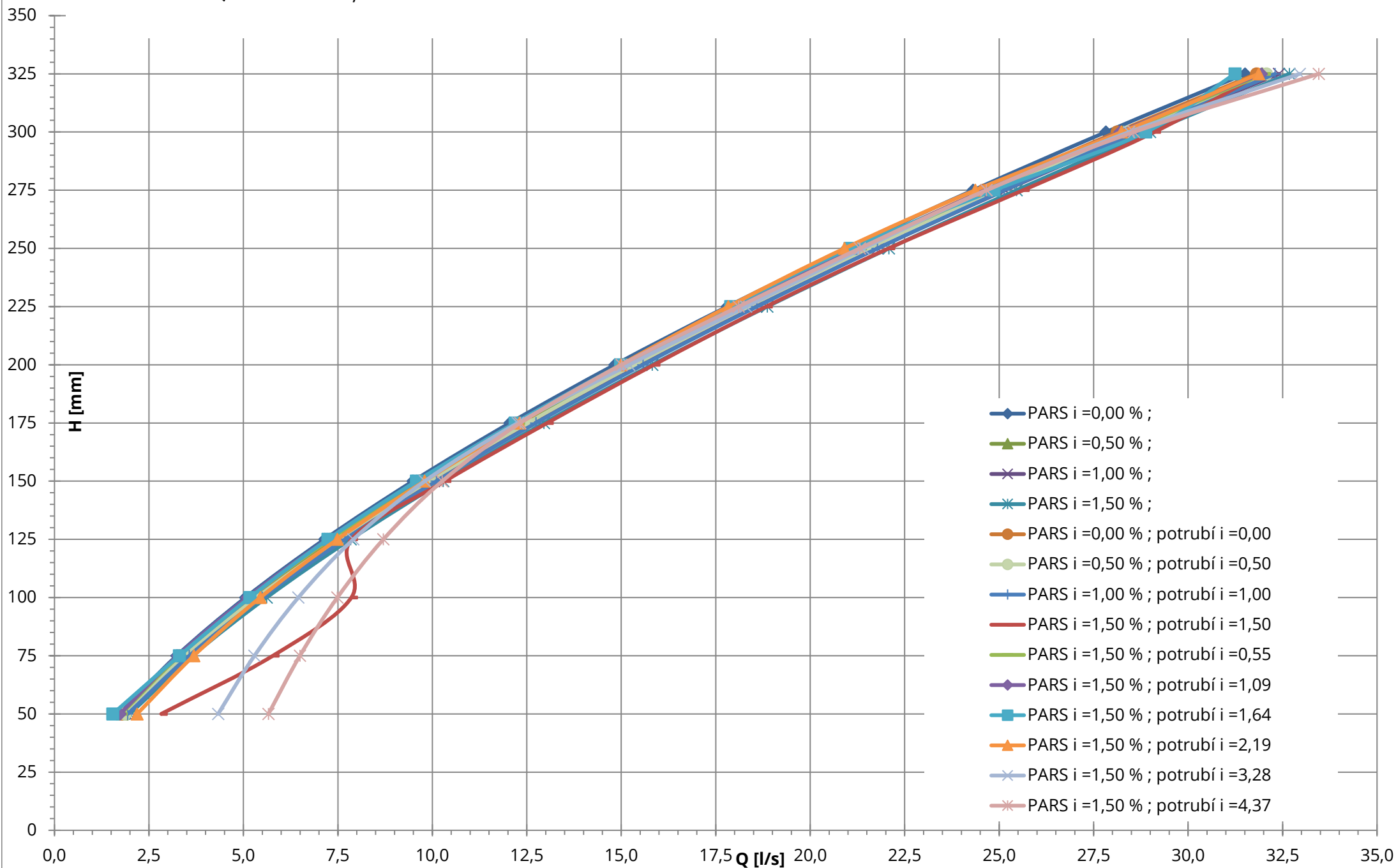
| | MODIFIKACE | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | PARS P3 | PARS P3 | PARS P3 | PARS P3 | PARS P3 | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM | s PŘÍVODNÍM POTRUBÍM |
| SKLON POTRUBÍ [%] | - | - | - | - | - | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0,55 | 1,09 | 1,64 | 2,19 | 3,28 | 4,37 |
| SKLON PARS P3 [%] | 0 | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

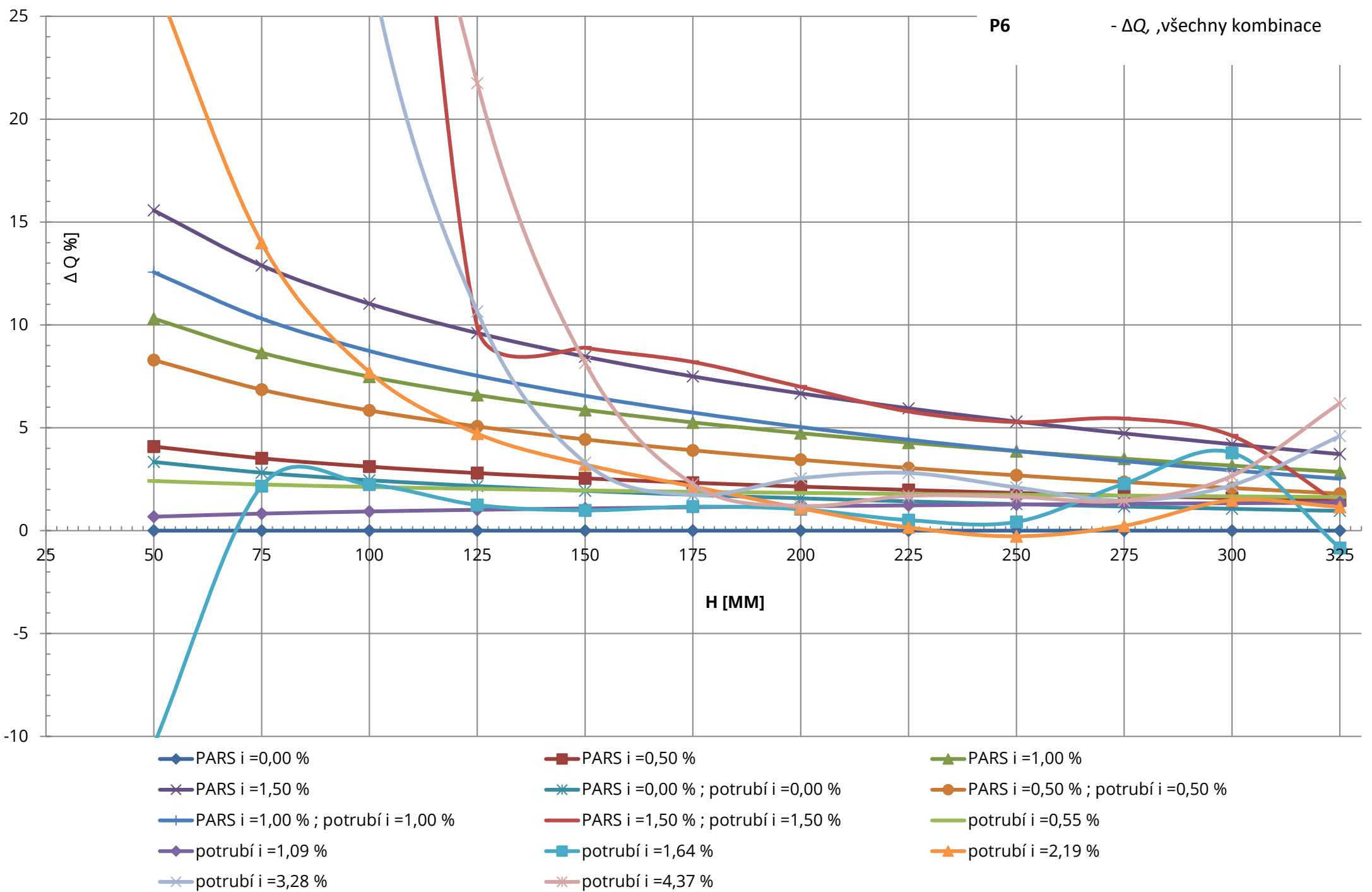
| H[mm] | Q[l/s] | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 50 | 1,724 | 1,724 | 1,794 | 1,902 | 1,992 | 1,781 | 1,867 | 1,940 | 2,825 | 1,766 | 1,736 | 1,544 | 2,187 | 4,331 | 5,663 |
| 75 | 3,235 | 3,235 | 3,349 | 3,515 | 3,652 | 3,326 | 3,457 | 3,568 | 5,782 | 3,308 | 3,262 | 3,305 | 3,687 | 5,292 | 6,495 |
| 100 | 5,056 | 5,056 | 5,213 | 5,435 | 5,614 | 5,180 | 5,351 | 5,498 | 7,857 | 5,163 | 5,103 | 5,169 | 5,446 | 6,454 | 7,486 |
| 125 | 7,149 | 7,149 | 7,349 | 7,620 | 7,836 | 7,304 | 7,511 | 7,687 | 7,857 | 7,294 | 7,221 | 7,238 | 7,486 | 7,911 | 8,704 |
| 150 | 9,488 | 9,488 | 9,729 | 10,044 | 10,290 | 9,671 | 9,908 | 10,110 | 10,331 | 9,673 | 9,590 | 9,581 | 9,793 | 9,801 | 10,262 |
| 175 | 12,053 | 12,053 | 12,333 | 12,687 | 12,956 | 12,262 | 12,523 | 12,744 | 13,040 | 12,280 | 12,190 | 12,193 | 12,311 | 12,262 | 12,325 |
| 200 | 14,829 | 14,829 | 15,146 | 15,531 | 15,818 | 15,062 | 15,340 | 15,575 | 15,865 | 15,101 | 15,005 | 14,983 | 14,990 | 15,206 | 15,007 |
| 225 | 17,804 | 17,804 | 18,156 | 18,565 | 18,862 | 18,057 | 18,346 | 18,590 | 18,835 | 18,121 | 18,022 | 17,894 | 17,831 | 18,303 | 18,105 |
| 250 | 20,967 | 20,967 | 21,351 | 21,778 | 22,079 | 21,238 | 21,531 | 21,779 | 22,074 | 21,332 | 21,233 | 21,056 | 20,910 | 21,408 | 21,311 |
| 275 | 24,310 | 24,310 | 24,724 | 25,160 | 25,459 | 24,595 | 24,885 | 25,132 | 25,635 | 24,724 | 24,627 | 24,864 | 24,368 | 24,668 | 24,663 |
| 300 | 27,826 | 27,826 | 28,265 | 28,705 | 28,995 | 28,121 | 28,402 | 28,642 | 29,110 | 28,290 | 28,197 | 28,880 | 28,237 | 28,441 | 28,567 |
| 325 | 31,508 | 31,508 | 31,970 | 32,406 | 32,679 | 31,810 | 32,075 | 32,302 | 31,911 | 32,022 | 31,937 | 31,241 | 31,870 | 32,955 | 33,458 |

| H[mm] | Q[l/s] | ΔQ [%] | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|----------------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|--------|-------|--------|--------|
| 50 | 1,724 | 0,000 | 4,09 | 10,31 | 15,56 | 3,34 | 8,29 | 12,56 | 63,88 | 2,41 | 0,68 | -10,42 | 26,88 | 151,25 | 228,48 |
| 75 | 3,235 | 0,000 | 3,51 | 8,65 | 12,89 | 2,82 | 6,85 | 10,30 | 78,74 | 2,24 | 0,83 | 2,16 | 13,99 | 63,60 | 100,78 |
| 100 | 5,056 | 0,000 | 3,11 | 7,49 | 11,03 | 2,45 | 5,84 | 8,73 | 55,40 | 2,12 | 0,93 | 2,24 | 7,70 | 27,66 | 48,06 |
| 125 | 7,149 | 0,000 | 2,80 | 6,59 | 9,61 | 2,17 | 5,06 | 7,53 | 9,90 | 2,03 | 1,01 | 1,25 | 4,72 | 10,65 | 21,75 |
| 150 | 9,488 | 0,000 | 2,54 | 5,87 | 8,46 | 1,94 | 4,43 | 6,55 | 8,89 | 1,95 | 1,08 | 0,99 | 3,22 | 3,30 | 8,16 |
| 175 | 12,053 | 0,000 | 2,33 | 5,26 | 7,50 | 1,74 | 3,90 | 5,74 | 8,19 | 1,89 | 1,14 | 1,17 | 2,15 | 1,74 | 2,26 |
| 200 | 14,829 | 0,000 | 2,14 | 4,74 | 6,67 | 1,57 | 3,45 | 5,03 | 6,99 | 1,83 | 1,19 | 1,04 | 1,09 | 2,55 | 1,20 |
| 225 | 17,804 | 0,000 | 1,98 | 4,28 | 5,95 | 1,42 | 3,05 | 4,42 | 5,79 | 1,79 | 1,23 | 0,51 | 0,15 | 2,80 | 1,69 |
| 250 | 20,967 | 0,000 | 1,83 | 3,87 | 5,30 | 1,29 | 2,69 | 3,87 | 5,28 | 1,74 | 1,27 | 0,42 | -0,27 | 2,10 | 1,64 |
| 275 | 24,310 | 0,000 | 1,70 | 3,50 | 4,72 | 1,17 | 2,36 | 3,38 | 5,45 | 1,70 | 1,30 | 2,28 | 0,23 | 1,47 | 1,45 |
| 300 | 27,826 | 0,000 | 1,58 | 3,16 | 4,20 | 1,06 | 2,07 | 2,93 | 4,61 | 1,67 | 1,33 | 3,79 | 1,48 | 2,21 | 2,66 |
| 325 | 31,508 | 0,000 | 1,47 | 2,85 | 3,72 | 0,96 | 1,80 | 2,52 | 1,28 | 1,63 | 1,36 | -0,85 | 1,15 | 4,59 | 6,19 |

P5

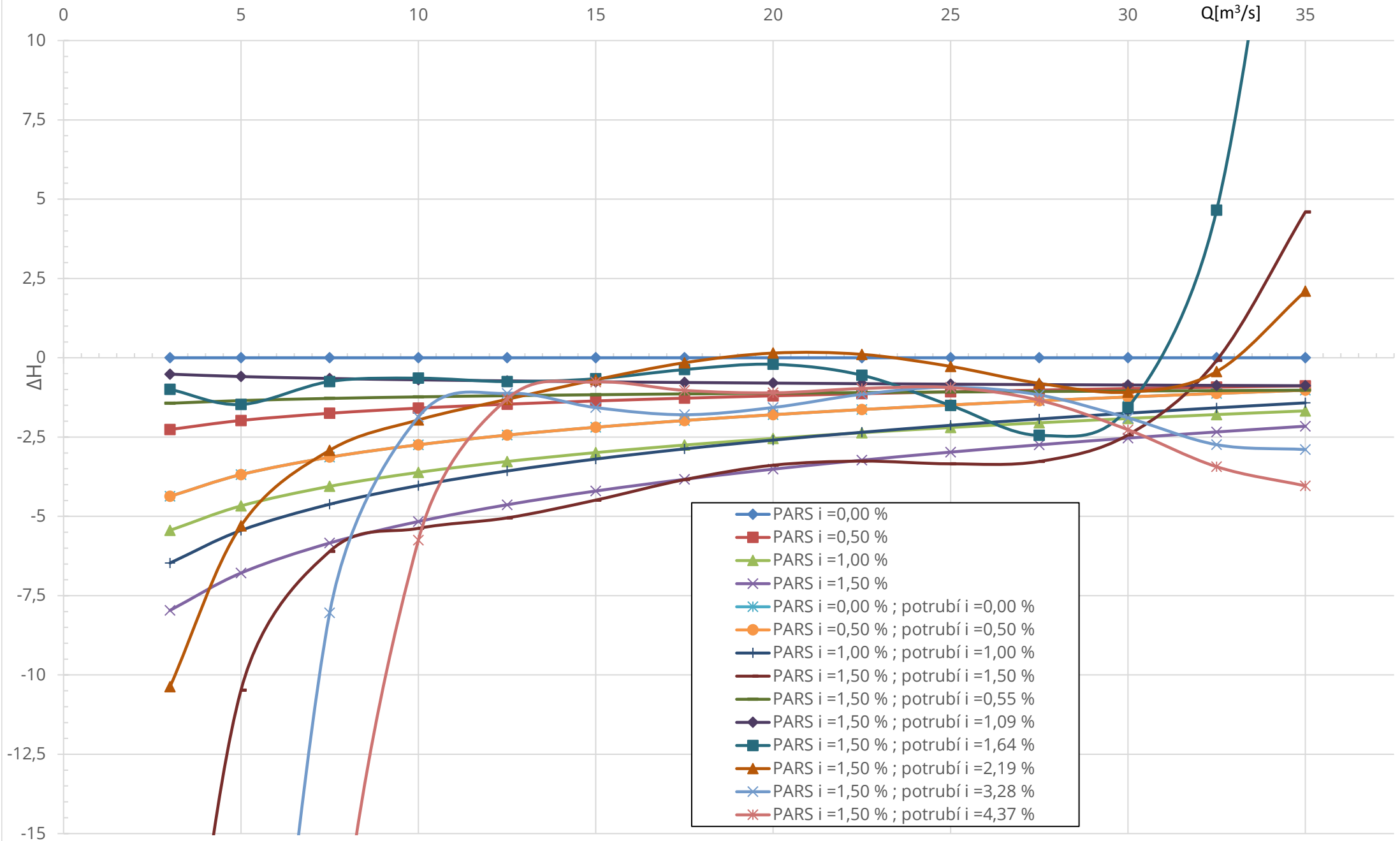
- Q/H charakteristiky kombinací





P7

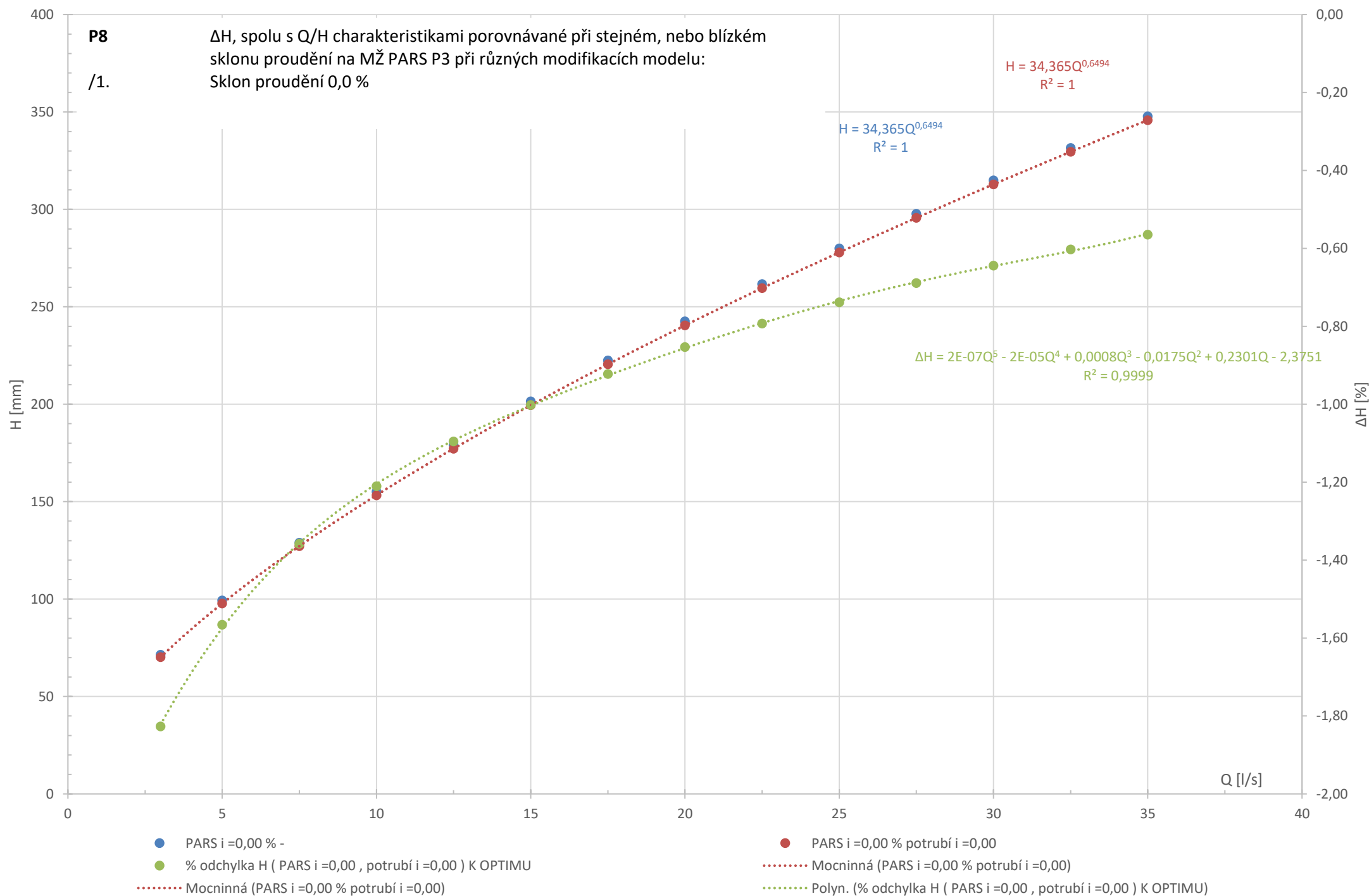
- ΔH , všechny kombinace



P8

/1.

ΔH , spolu s Q/H charakteristikami porovnávané při stejném, nebo blízkém sklonu proudění na MŽ PARS P3 při různých modifikacích modelu:
Sklon proudění 0,0 %



P8
/1.

ΔQ spolu s Q/H charakteristikami porovnáváné při stejném, nebo blízkém sklonu proudění na MŽ PARS P3 při různých modifikacích modelu:
Sklon proudění 0,0 %

Q [l/s]

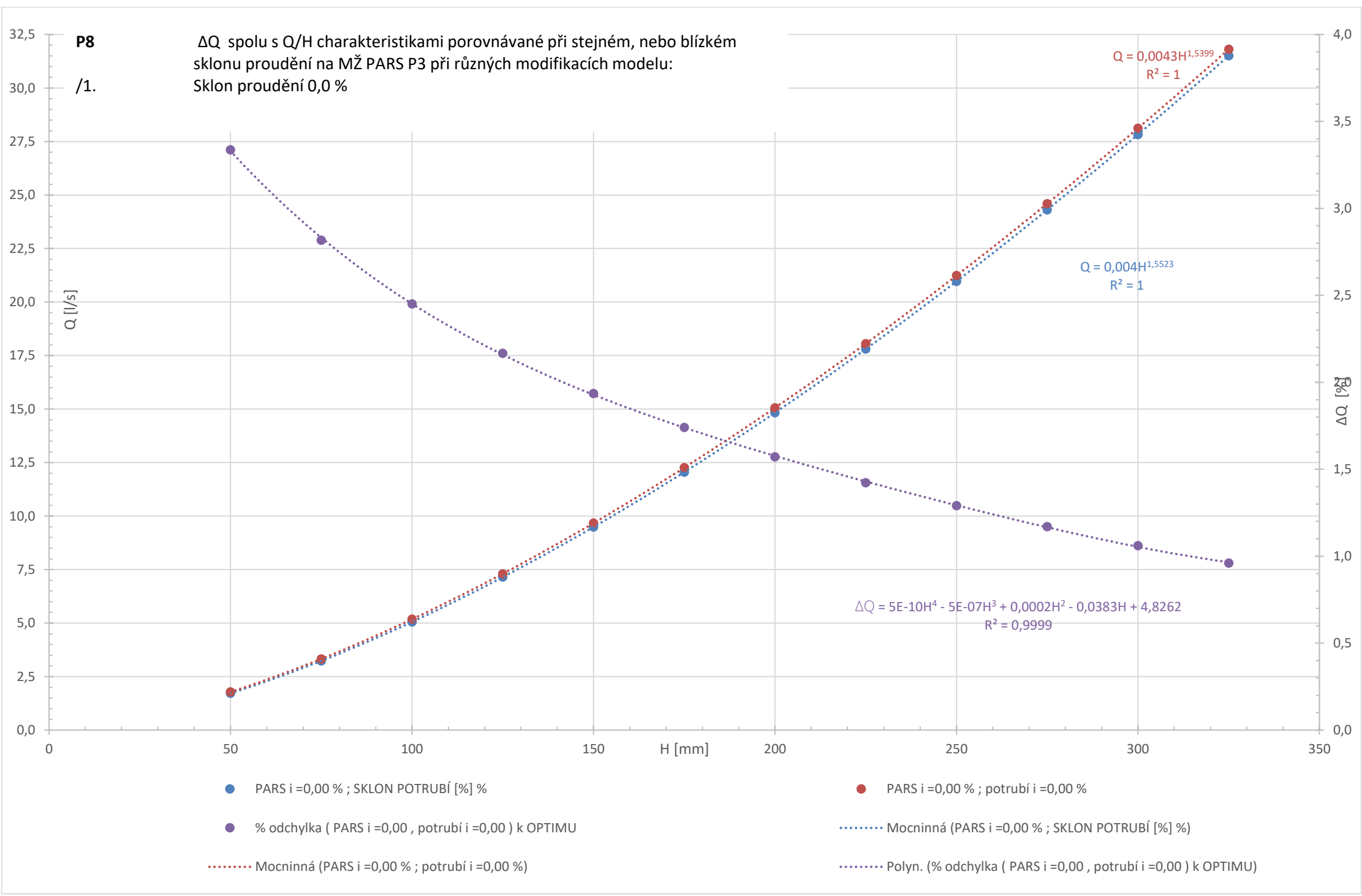
ΔQ [%]

- PARS i = 0,00 % ; SKLON POTRUBÍ [%] %
- PARS i = 0,00 % ; potrubí i = 0,00 %
- % odchylka (PARS i = 0,00 , potrubí i = 0,00) k OPTIMU
- Mocinná (PARS i = 0,00 % ; SKLON POTRUBÍ [%] %)
- Mocinná (PARS i = 0,00 % ; potrubí i = 0,00 %)
- Polyn. (% odchylka (PARS i = 0,00 , potrubí i = 0,00) k OPTIMU)

$Q = 0,0043H^{1,5399}$
 $R^2 = 1$

$Q = 0,004H^{1,5523}$
 $R^2 = 1$

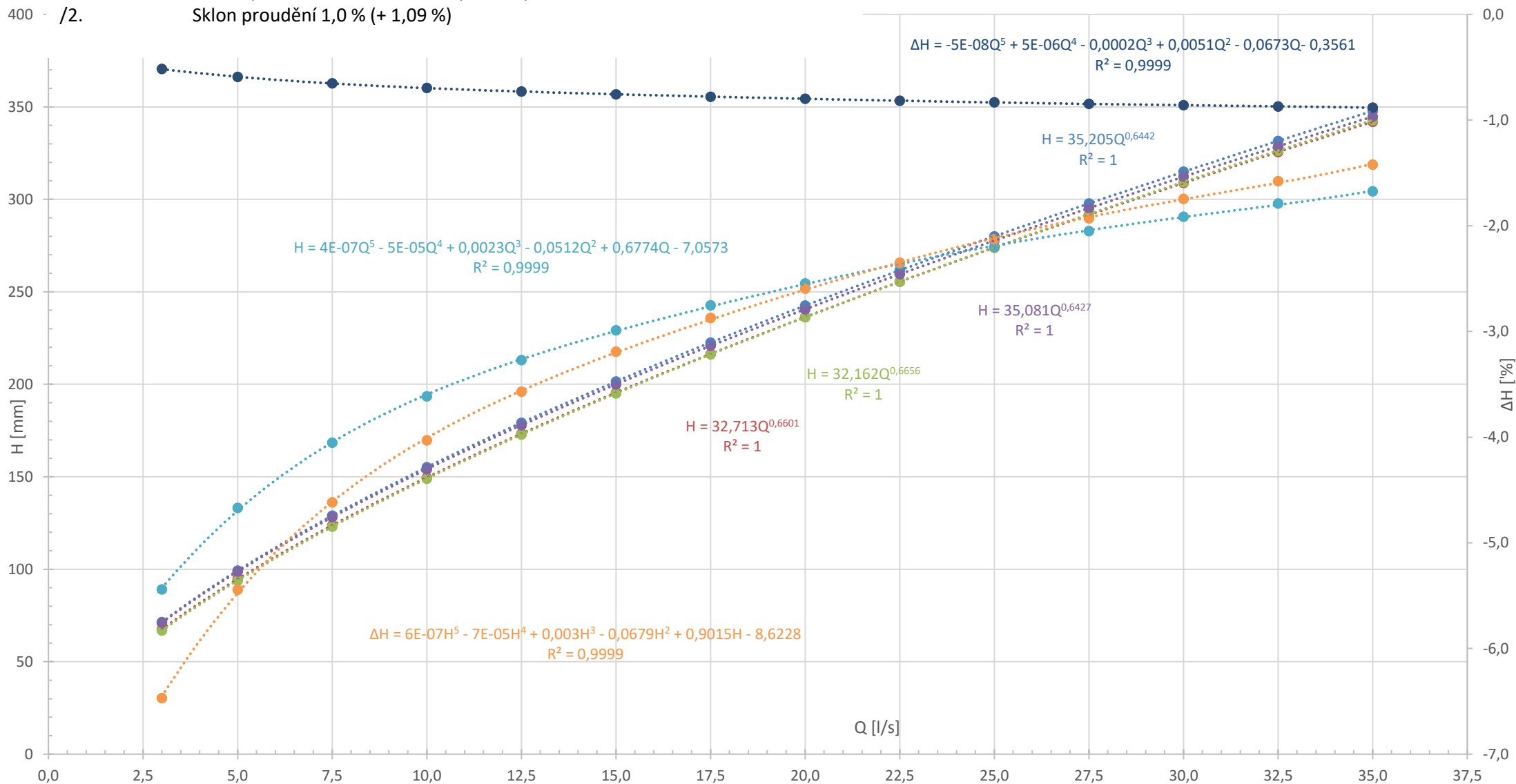
$\Delta Q = 5E-10H^4 - 5E-07H^3 + 0,0002H^2 - 0,0383H + 4,8262$
 $R^2 = 0,9999$



P8

ΔH , spolu s Q/H charakteristikami porovnávané při stejném, nebo blízkém sklonu proudění na MŽ PARS P3 při různých modifikacích modelu:
Sklon proudění 1,0 % (+ 1,09 %)

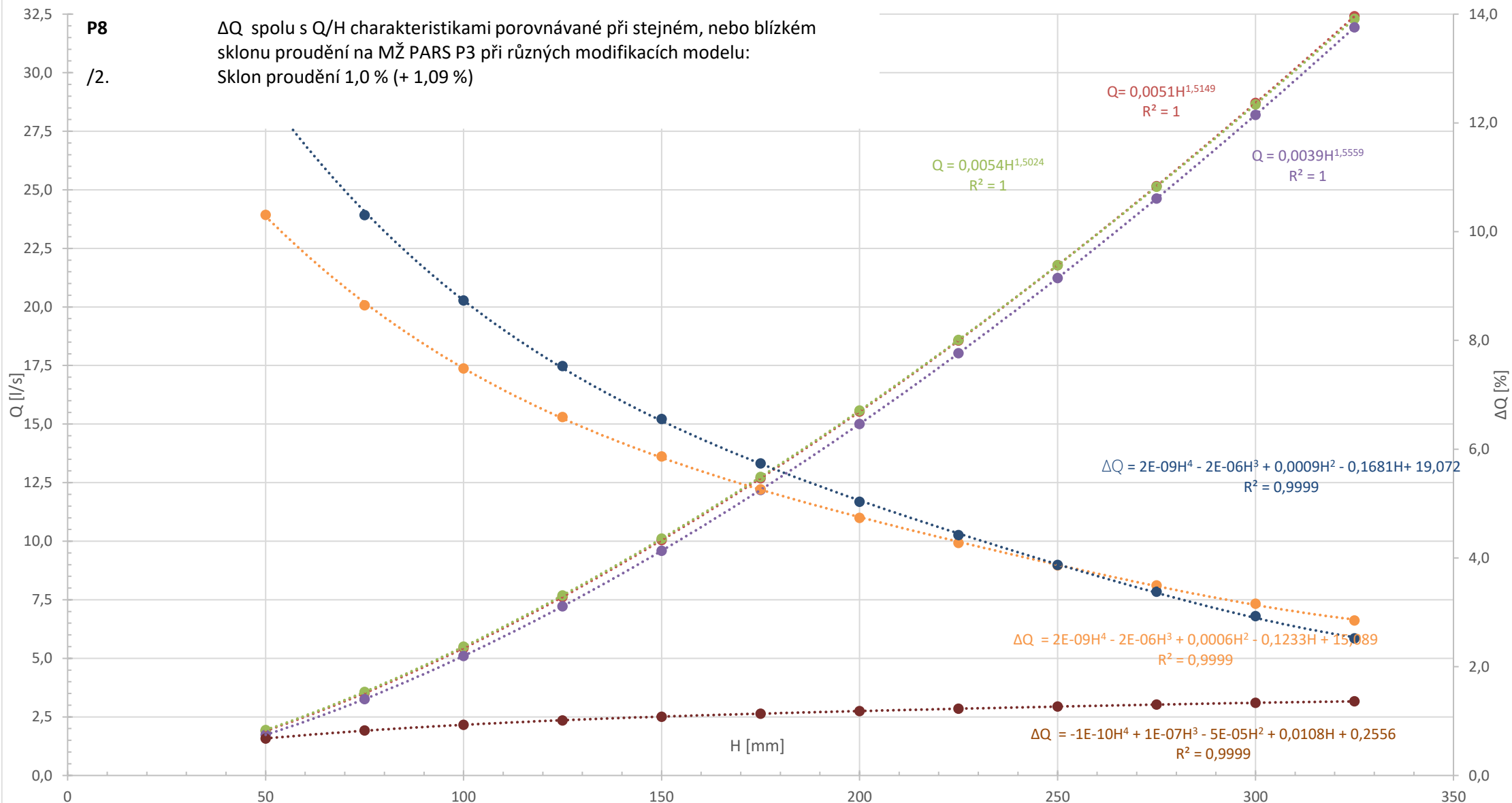
/2.



P8

/2.

ΔQ spolu s Q/H charakteristikami porovnáváné při stejném, nebo blízkém sklonu proudění na MŽ PARS P3 při různých modifikacích modelu:
Sklon proudění 1,0 % (+ 1,09 %)



- PARS i=1,00 % ; potrubí i=0,00 %
- PARS i=0,00 % ; potrubí i=0,00 %
- % odchylka (PARS i=1,00 , potrubí i=1,00) k OPTIMU K PARS i=0,00 ; -
- Mocninná (PARS i=1,00 % ; potrubí i=0,00 %)
- Mocninná (PARS i=0,00 % ; potrubí i=0,00 %)
- Polyn. (% odchylka (PARS i=1,00 , potrubí i=1,00) k OPTIMU K PARS i=0,00 ; -)
- PARS i=1,00 % ; potrubí i=0,00 %
- % odchylka (PARS i=1,00 , -) k OPTIMU K PARS i=0,00 ; -
- % odchylka (PARS i=0,00 , potrubí i=1,09) k OPTIMU K PARS i=0,00 ; -
- Mocninná (PARS i=1,00 % ; potrubí i=0,00 %)
- Polyn. (% odchylka (PARS i=1,00 , -) k OPTIMU K PARS i=0,00 ; -)
- Polyn. (% odchylka (PARS i=0,00 , potrubí i=1,09) k OPTIMU K PARS i=0,00 ; -)

P9

Freudovo kritérium

/1.

Ukázka zpracování

| § TRUBKOU | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS |
|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 0,55 | 1,09 | 1,64 | 2,19 | 3,28 | 4,37 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hloubka vody v potrubí ve vzdálenosti 4D | | | | | | |
| 50 | 43,44 | 26,24 | 28,56 | 24,60 | 28,45 | 31,13 |
| 75 | 68,44 | 62,01 | 36,15 | 29,46 | 31,42 | 33,48 |
| 100 | 93,44 | 87,01 | 80,45 | 34,99 | 34,92 | 36,21 |
| 125 | 118,44 | 112,01 | 105,45 | 98,90 | 39,19 | 39,45 |
| 150 | 143,44 | 137,01 | 130,45 | 123,90 | 44,52 | 43,42 |
| 175 | 168,44 | 162,01 | 155,45 | 148,90 | 135,90 | 48,38 |
| 200 | 193,44 | 187,01 | 180,45 | 173,90 | 160,90 | 147,91 |
| 225 | 218,44 | 212,01 | 205,45 | 198,90 | 185,90 | 172,91 |
| 250 | 243,44 | 237,01 | 230,45 | 223,90 | 210,90 | 197,91 |
| 275 | 268,44 | 262,01 | 255,45 | 248,90 | 235,90 | 222,91 |
| 300 | 293,44 | 287,01 | 280,45 | 273,90 | 260,90 | 247,91 |
| 325 | 318,44 | 312,01 | 305,45 | 298,90 | 285,90 | 272,91 |

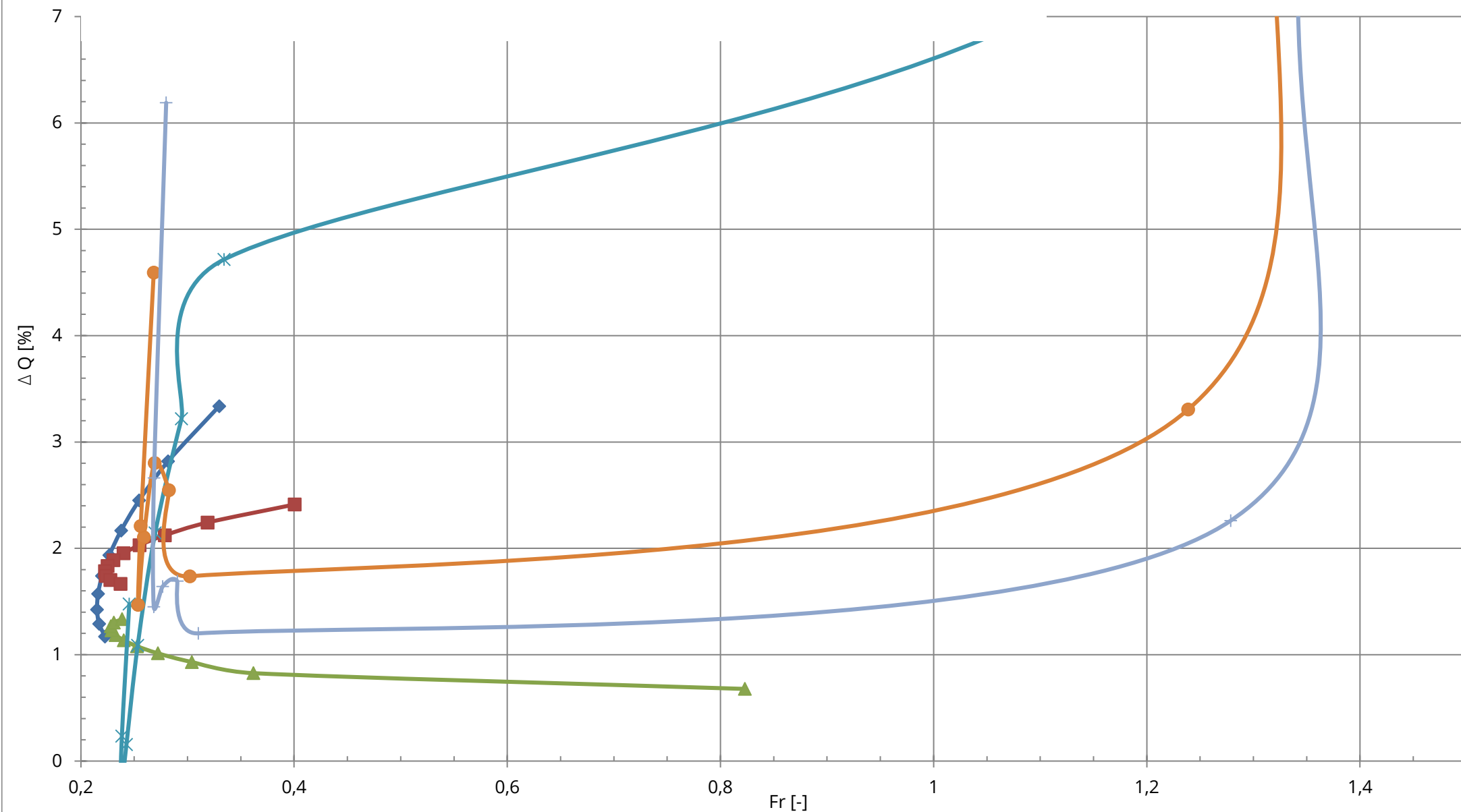
| Průtočná plocha S [m ²] | | | | | | |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,00771 | 0,00629 | 0,00301 | 0,00341 | 0,00274 | 0,00339 | 0,00387 |
| 0,01376 | 0,01209 | 0,01051 | 0,00482 | 0,00357 | 0,00392 | 0,00431 |
| 0,02054 | 0,01871 | 0,01695 | 0,01519 | 0,00459 | 0,00458 | 0,00483 |
| 0,02775 | 0,02583 | 0,02396 | 0,02208 | 0,02023 | 0,00542 | 0,00547 |
| 0,03517 | 0,03322 | 0,03130 | 0,02936 | 0,02743 | 0,00652 | 0,00629 |
| 0,04258 | 0,04065 | 0,03874 | 0,03680 | 0,03484 | 0,03098 | 0,00736 |
| 0,04977 | 0,04792 | 0,04608 | 0,04418 | 0,04226 | 0,03842 | 0,03455 |
| 0,05650 | 0,05479 | 0,05307 | 0,05128 | 0,04946 | 0,04576 | 0,04197 |
| 0,06247 | 0,06100 | 0,05948 | 0,05788 | 0,05621 | 0,05277 | 0,04918 |
| 0,06727 | 0,06616 | 0,06496 | 0,06364 | 0,06223 | 0,05922 | 0,05596 |
| - | 0,06952 | 0,06892 | 0,06808 | 0,06709 | 0,06474 | 0,06201 |
| - | - | - | - | - | 0,06879 | 0,06693 |

| § TRUBKOU | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS | § TRUBKOU+POD LOŽENÍ PARS |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 0,55 | 1,09 | 1,64 | 2,19 | 3,28 | 4,37 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fr [-] | | | | | | |
| 0,330 | 0,400 | 0,823 | 1,371 | 1,141 | 1,824 | 2,090 |
| 0,282 | 0,319 | 0,362 | 1,257 | 1,204 | 1,573 | 1,758 |
| 0,255 | 0,279 | 0,304 | 0,484 | 1,197 | 1,423 | 1,565 |
| 0,238 | 0,255 | 0,272 | 0,391 | 0,334 | 1,319 | 1,437 |
| 0,227 | 0,240 | 0,253 | 0,339 | 0,294 | 1,239 | 1,345 |
| 0,220 | 0,231 | 0,240 | 0,308 | 0,270 | 0,302 | 1,279 |
| 0,216 | 0,225 | 0,232 | 0,290 | 0,253 | 0,283 | 0,310 |
| 0,215 | 0,223 | 0,229 | 0,280 | 0,243 | 0,269 | 0,290 |
| 0,217 | 0,223 | 0,228 | 0,275 | 0,238 | 0,259 | 0,277 |
| 0,223 | 0,228 | 0,231 | 0,273 | 0,238 | 0,254 | 0,268 |
| - | 0,237 | 0,238 | 0,276 | 0,245 | 0,256 | 0,269 |
| - | - | - | - | - | 0,268 | 0,280 |

| Vnitřní úhel [rad] | | | | | | |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,6881 | 1,5671 | 1,2052 | 1,2590 | 1,1658 | 1,2565 | 1,3164 |
| 2,1021 | 1,9992 | 1,8947 | 1,4230 | 1,2794 | 1,3227 | 1,3673 |
| 2,4714 | 2,3774 | 2,2834 | 2,1855 | 1,3989 | 1,3975 | 1,4243 |
| 2,8180 | 2,7285 | 2,6398 | 2,5484 | 2,4557 | 1,4843 | 1,4896 |
| 3,1550 | 3,0670 | 2,9804 | 2,8920 | 2,8030 | 1,5875 | 1,5665 |
| 3,4924 | 3,4033 | 3,3164 | 3,2282 | 3,1402 | 2,9656 | 1,6589 |
| 3,8403 | 3,7474 | 3,6575 | 3,5670 | 3,4773 | 3,3015 | 3,1270 |
| 4,2121 | 4,1113 | 4,0148 | 3,9187 | 3,8245 | 3,6421 | 3,4639 |
| 4,6313 | 4,5146 | 4,4053 | 4,2983 | 4,1949 | 3,9985 | 3,8105 |
| 5,1571 | 5,0017 | 4,8634 | 4,7332 | 4,6112 | 4,3870 | 4,1797 |
| - | 5,7873 | 5,5101 | 5,3027 | 5,1296 | 4,8408 | 4,5934 |
| - | - | - | - | - | 5,4717 | 5,1056 |

P9
/2.

Freudovo kritérium
Vybraný graf závislosti Fr na ΔQ vzdálenost v potrubí 4D



◆ PARS $i=0,00$; potrubí $i=0,00$ ■ PARS $i=0,00$; potrubí $i=0,55$ ▲ PARS $i=0,00$; potrubí $i=1,09$ ✕ PARS $i=0,00$; potrubí $i=1,64$
✱ PARS $i=0,00$; potrubí $i=2,19$ ● PARS $i=0,00$; potrubí $i=3,28$ + PARS $i=0,00$; potrubí $i=4,37$